

БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ОТ РАССЕЯННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© С. А. КОНДРАТЬЕВ,^{*1} М. В. ШМАКОВА,^{*2} Е. Г. МАРКОВА,^{*3} П. А. ЛОЗОВИК,^{**4}
А. Ю. БРЮХАНОВ,^{***5} Е. Ф. ЧИЧКОВА^{****6}

* Институт озерадения РАН, Санкт-Петербург

** Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск

*** Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства. Санкт-Петербург

**** Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

E-mail: ¹ kondratyev@limno.org.ru

² m-shmakova@yandex.ru

³ adelmonamour@mail.ru

⁴ lozovik@nwpi.krc.karelia.ru

⁵ sznii@yandex.ru

⁶ chichkova@rtc.ru

Впервые разработана детерминированно-стохастическая модель формирования стока и рассеянной (диффузной) биогенной нагрузки на Онежское озеро со стороны водосбора. В качестве источника информации о структуре подстилающей поверхности водосбора использовались результаты дешифрирования космических снимков. С помощью модели рассчитаны значения параметров распределения слоя стока с водосбора и биогенной нагрузки на Онежское озеро.

Ключевые слова: Онежское озеро, водосбор, модель, биогенная нагрузка, космический снимок.

Цель исследования — расчет диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро от рассеянных источников с использованием разработанной для этого модели и сравнение полученных результатов моделирования с оценками по натурным наблюдениям.

Онежское озеро — второй по величине пресноводный водоем в Европе после Ладожского озера. Антропогенное влияние на экосистему Онежского озера привело к тому, что биогенная нагрузка общим фосфором достигла допустимого уровня, соответствующего верхней границе олиготрофных водоемов. При этом диффузная биогенная нагрузка от рассеянных источников на озеро до сих пор не была количественно оценена. Модель формирования биогенной нагрузки, являющаяся средством прогноза последствий антропогенного влияния водосборной территории на озеро, отсутствует.

В соответствии с выводами работы [8, с. 37] структура модели стока и выноса веществ с водосбора определяется следующими основными факторами.

1. Целью моделирования.
2. Особенности изучаемого водосбора.
3. Наличием и составом исходной информации, необходимой для выполнения расчетов по модели и оценки адекватности модели.

Водосбор Онежского озера — часть водосбора Финского залива Балтийского моря, улучшению экологического состояния которого в настоящее время уделяется большое внимание. В ноябре 2007 г. на сессии Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ принят План действий по Балтийскому морю (ПДБМ) [10, с. 9], который представляет собой долговременную стратегию оздоровления Балтийского моря. Одно из важнейших направлений ПДБМ — разработ-

ка мероприятий по снижению поступления в морскую экосистему общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$) для предотвращения нежелательного эвтрофирования моря. ПДБМ предполагает в будущем установление платы за избыточное поступление биогенных веществ в Балтийское море от каждой страны. Все страны Балтийского региона в настоящее время озадачены поиском путей снижения фосфорной и азотной нагрузки на Балтийское море с различных участков водосбора. Поэтому модель должна в первую очередь описывать среднегодовое поступление в Онегу $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ со стороны водосборного бассейна.

Гидрографическую сеть бассейна Онежского озера образуют 6765 рек общей длиной 22 741 км и 9516 озер общей площадью 13 441 км². Максимальное количество водотоков (95 %) составляют малые реки, длиной менее 10 км, и лишь реки Шуя, Суна, Водла, Андома имеют протяженность более 100 км [6, с. 17]. Описать такую сложную гидрографическую сеть в рамках пространственно неоднородной детерминированной модели выноса веществ в настоящий момент не представляется возможным. Поэтому для решения задачи оценки биогенной нагрузки на озеро целесообразно использовать концептуальную схему построения модели, в которой водосбор озера (или одного из притоков) представляется в виде однородного имитирующего элемента, а соотношение между входными и выходными характеристиками определяется осредненными параметрами среды [3, с. 73].

Существующая система государственного мониторинга водных объектов характеризуется постоянным сокращением числа пунктов наблюдения, сложностями с получением результатов мониторинга и невысоким качеством измерений. Данные статистической отчетности по факторам, влияющим на формирование нагрузки (минеральным и органическим удобрениям, численности домашних животных, выращиваемым сельскохозяйственным культурам и др.), приводятся с пробелами во времени, только для административных единиц и по ограниченному количеству показателей. Из сказанного можно сделать вывод об остром дефиците исходных данных, необходимых для выполнения требуемых расчетов. Опыт практического использования моделей [3, с. 49] показывает, что в таких ситуациях целесообразно использовать по возможности более простые модели.

Кроме того, при выборе модели формирования биогенной нагрузки на Онежское озеро следует помнить, что в настоящее время при решении широкого круга прикладных задач, связанных с оценкой и прогнозом стока, а также выноса взвешенных и растворенных веществ с водосборов, возникает потребность расчета не только средних значений искомым характеристик, но и диапазонов их возможных изменений (т. е. параметров функций распределения, позволяющих рассчитывать соответствующие обеспеченности превышения). В то же время современное состояние системы государственного мониторинга водных объектов далеко не всегда позволяет получить необходимые многолетние ряды характеристик, требующихся для расчета их функций распределения. Одним из возможных способов решения такого рода задач служит использование детерминированно-стохастических (ДС) моделей, включающих блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели, описывающих сток и вынос веществ с водосбора.

С учетом всего сказанного выше для решения задач, связанных с оценкой биогенной нагрузки на Онежское озеро, целесообразно использовать ДС мо-

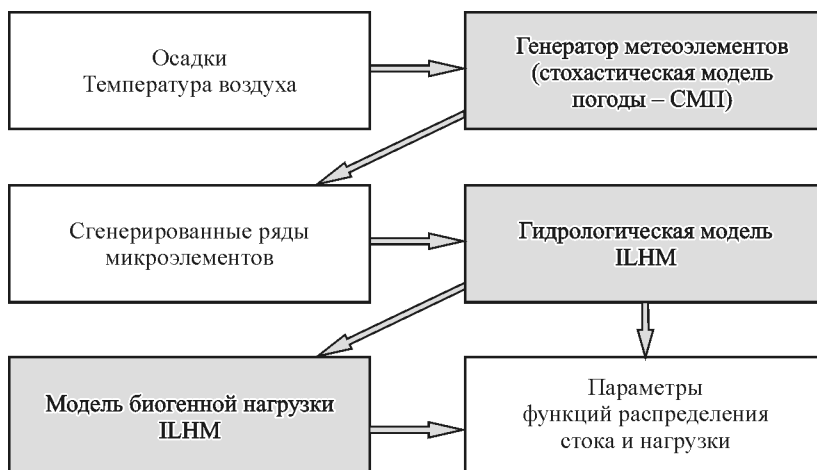


Рис. 1. Схема ДС модели стока и биогенной нагрузки.

дель, структура которой показана на рис. 1, а описание основных блоков приведено ниже.

Стохастическая модель погоды. Для оценки возможных изменений параметров распределения гидрологических характеристик под руководством Ю. Б. Виноградова разработана и практически реализована стохастическая модель погоды (СМП) [2, с. 260; 9, с. 14]. Модель служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей формирования стока. Ориентация на метеорологическую информацию в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных значений метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стокосые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса веществ с водосбора. СМП генерирует ряды метеозлементов, которые являются входной информацией для последующего моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосбора.

Модель формирования стока. Гидрологическая модель формирования стока с водосбора (ILHM) (Institute of Limnology Hydrological Model) разработана в Институте озераведения РАН [3, с. 133] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель 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 успешно использовалась на водосборах бассейна Онежского озера для решения задачи по оценке воздействия возможных климатических изменений на формирование гидрографов стока [4, с. 24].

Модель биогенной нагрузки. 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 [5, с. 53], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [11, с. 38]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассеянными 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.

В соответствии с моделью ILLM нагрузка $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на водоем-водоприемник (L) со стороны водосбора рассчитывается как сумма биогенной нагрузки на гидрографическую сеть водосбора, сформированную сельхозпредприятиями (L_{agr}), и нагрузку, сформированную естественными и антропогенными ландшафтами, не подверженными в настоящее время сельскохозяйственному воздействию (L_c). Кроме того, в формировании нагрузки принимают участие точечные источники загрязнения, от которых сточные воды поступают в гидрографическую сеть (L_{p1}) и непосредственно в водоем-водоприемник (L_{p2}):

$$L = (L_{\text{agr}} + L_c + L_{p1}) (1 - R) + L_{p2}, \quad (1)$$

где R — безразмерный коэффициент (удерживающая способность водосборной территории). Все остальные члены уравнения (1) имеют размерность (т/год). При расчетах нагрузки от рассеянных источников из рассмотрения исключаются точечные источники загрязнения: $L_{\text{dif}} = (L_{\text{agr}} + L_c + L_{p1}) (1 - R)$.

В настоящей работе использовался усовершенствованный вариант модели, дополненный специальным блоком, позволяющим детально описывать формирование биогенной нагрузки на сельхозпредприятиях и разработанным Институтом агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) применительно к условиям Северо-Запада России [7, с. 11]. Поскольку ранее этот метод расчета не был опубликован, ниже приведено его описание.

Нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий (L_{agr} в уравнении (1)), рассчитывается следующим образом:

$$L_{\text{agr}} = \sum_i A_i (M_{\text{soil}i} K_1 + (\alpha_1 M_{\text{mini}} + \alpha_2 M_{\text{orgi}}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000, \quad (2)$$

где $M_{\text{soil}i}$, M_{mini} и M_{orgi} — содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля i -го сельхозпредприятия (кг/га); A_i — площадь угодий i -го сельхозпредприятия (га); α_1 — коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами; α_2 — коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами; K_1 — коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв; K_2 — коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической

Таблица 1
Значения коэффициентов уравнения (1)

Коэффициент	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$
α_1	0.3	0.03
α_2	0.1	0.02
K_1	0.03	0.008
K_2 (от 50 до 500 м)	0.6	0.6
K_2 (от 500 до 2000 м)	0.2	0.2
K_2 (более 2000 м)	0.1	0.1
K_3 (дерново-подзолистые почвы)	1	1
K_3 (карбонатные почвы)	1.2	1.4
K_3 (торфянистые почвы)	0.8	1
K_4 (тяжелые глинистые и суглинистые почвы)	1	1
K_4 (легкие супесчаные и песчаные почвы)	1.8	2
K_5 (крупный рогатый скот)	0.46	0.37
K_5 (растениеводство)	0.88	0.76
K_5 (птицеводство)	0.46	0.37
K_5 (свиноводство)	0.46	0.37
K_6 (без НДТ)	1	1
K_6 (с использованием НДТ)	0.25	0.1

сети; K_3 — коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению); K_4 — коэффициент, характеризующий механический состав почв; K_5 — коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т. е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ; K_6 — коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических и минеральных удобрений. Все коэффициенты безразмерные. Значения указанных коэффициентов, рекомендованные для использования при расчетах биогенной нагрузки с сельхозугодий Северо-Запада России, приведены в табл. 1.

Результаты расчетов рассредоточенной биогенной нагрузки, сформированной на сельхозпредприятиях и в личных подсобных хозяйствах водосбора Онежского озера, представлены в табл. 2. При этом учитывалось внесение

Таблица 2
Биогенная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора Онежского озера, сформированная различными домашними животными в современных условиях

Наименование	Количество голов	Площадь, га	Нагрузка $N_{\text{общ}}$, т/год	Нагрузка $P_{\text{общ}}$, т/год
Крупный рогатый скот	28536	21437	587.1	43.3
Свиньи	11820	1563	42.9	3.1
Овцы, козы	4940	2477	81.5	4.8
Птица	498500	2250	79.8	4.4
Сумма		27727	791.3	55.6

минеральных и органических удобрений на указанные в таблице площади. Полученные значения использовались в качестве входной информации для выполнения последующих расчетов суммарной диффузной нагрузки на основе модели ILLM.

Важным показателем при расчете биогенной нагрузки, сформированной сельхозпроизводством, является содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в навозе, образующемся при ведении животноводства и птицеводства. Поэтому расчеты, представленные в табл. 2, произведены по методике определения годового выхода навоза/помета и его качественных характеристик, учитывающей современные технологии содержания животных и систем удаления навоза [1, с. 80].

Существенные проблемы при моделировании выноса биогенных веществ с крупных водосборов возникают в связи с необходимостью достоверного определения площадей различных типов подстилающей поверхности, которые характеризуются различными значениями эмиссии азота и фосфора в стекающие дождевые и талые воды, а также используются при вычислении значений L_c в уравнении (1). В настоящей работе для оценки указанных площадей применялись данные космической съемки, находящиеся в режиме свободного доступа. Использование архива снимков космического аппарата (КА) Landsat-8 Геологической службы США (USGS — United States Geological Survey, <http://earthexplorer.usgs.gov>) обусловлено двумя обстоятельствами: КА Landsat-8 — современная космическая система среднего пространственного разрешения, доступ к этому архиву является бесплатным. В архиве представлена весьма обширная коллекция съемки, включая и территорию России. Идентификация различных типов подстилающей поверхности водосбора Онежского озера была проведена в основном по данным космического аппарата (КА) Landsat-8 (30-метрового пространственного разрешения) для рассматриваемого водосбора в период малооблачной погоды (менее 20 %) 2014—2015 гг. и по данным КА Terra/MODIS (250-метрового пространственного разрешения). Процедура идентификации представляла собой распознавание интересующих объектов с применением различных методов обработки спутниковых снимков. В настоящей задаче использовался метод классификации, представляющий собой процесс отнесения изображенных на снимке пикселей к определенному классу с помощью выделения существенных спектральных, геометрических и текстурных признаков, характеризующих эти объекты. Для распознавания типов поверхностей использовались данные семи каналов КА Landsat-8 (видимого и ближнего инфракрасного диапазонов съемки) и данные двух каналов КА Terra/MODIS: 1 (0.62—0.67 мкм); 2 (0.841—0.876 мкм). Для задания эталонов распознавания по космической съемке КА Terra/MODIS использовались результаты классификации по типам, полученные при анализе данных КА Landsat-8 по заданным водосборам. Идентифицировались следующие типы подстилающей поверхности: леса; поля; луга; болота; селитебные зоны, свалки и заброшенные территории; водные объекты. Результаты идентификации представлены на рис. 2. Рассчитанные значения площадей для всех идентифицированных типов подстилающей поверхности приведены в табл. 3.

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. Получены аппроксимации годового хода и параметры распределения метеорологических элементов. Коэффициент корреляции между смежными

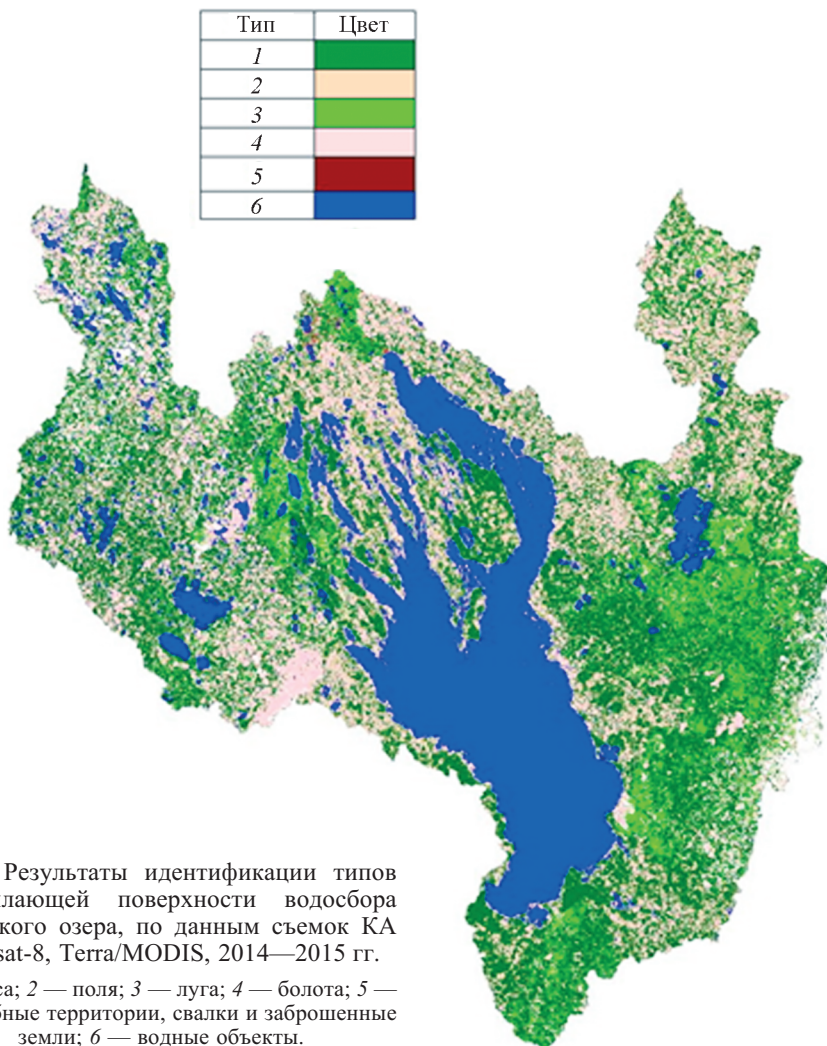


Рис. 2. Результаты идентификации типов подстилающей поверхности водосбора Онежского озера, по данным съемок КА Landsat-8, Terra/MODIS, 2014—2015 гг.

1 — леса; 2 — поля; 3 — луга; 4 — болота; 5 — селитебные территории, свалки и заброшенные земли; 6 — водные объекты.

Таблица 3

Площади различных типов подстилающей поверхности водосбора, полученные в результате дешифрирования космических снимков

Тип поверхности	Площадь, км ²
Леса	25407
Поля	1254
Луга	6171
Болота	13793
Селитебные территории, свалки, заброшенные земли	335
Водные объекты (включая Онежское озеро)	11430

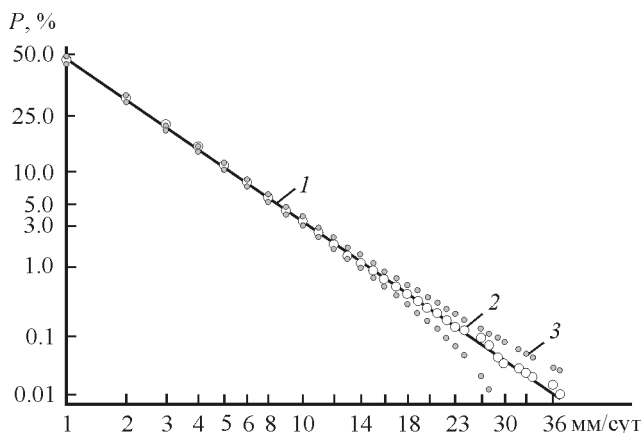


Рис. 3. Аналитическая (1) и эмпирическая (2) функционально-нормальные усеченные кривые распределения суточных слоев осадков, осредненных для водосбора Онежского озера, с 95%-ным доверительным интервалом (3).

членами ряда нормированных значений температуры воздуха составил 0.797. На рис. 3 приведены аналитическая и эмпирическая функционально-нормальные усеченные кривые распределения суточных слоев осадков, осредненных для водосбора Онежского озера. Степень усечения и параметры распределения (среднее, среднее квадратическое распределение и параметр нормализации) получены подбором, путем линеаризации эмпирической усеченной кривой распределения в клетчатке нормального закона распределения.

На основании полученных параметров 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 метеозлементов. На рис. 4 приведены кривые распределения годовых слоев стока для водосбора Онежского озера, рассчитанные по этим данным.

Результаты ДС моделирования стока и диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро с частного водосбора, полученные по имеющимся данным об интенсивности источников поступления биогенных веществ и с использова-

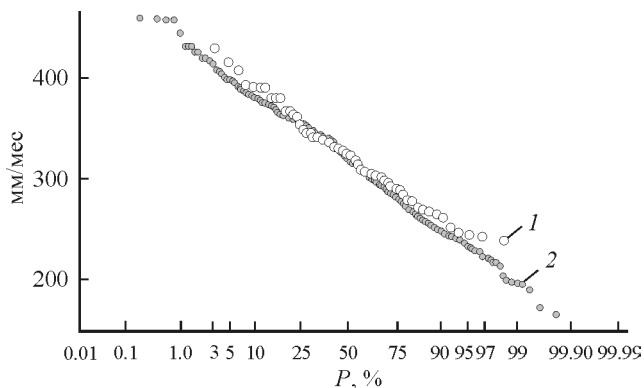


Рис. 4. Распределение рассчитанных по реальным (1) и сгенерированным метеорологическим данным (2) годовых слоев стока для Онежского озера.

Таблица 4

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*

	$\bar{X}$	σ	$X_1 \%$	$X_5 \%$	$X_{25} \%$	$X_{75} \%$	$X_{95} \%$	$X_{99\%}$
H , мм	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

Примечание. * Природные составляющие нагрузки LP_{nat} и LN_{nat} : среднее — $\bar{X}$, среднее квадратичное отклонение — σ ; X — значения нагрузки обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % соответственно.

нием космической информации о структуре изучаемого водосбора, представлены в табл. 4. Из приведенных данных следует, что существенное увеличение нагрузки приходится на многоводный период, что объясняется прямой связью значений биогенной нагрузки и стока.

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). Осредненная за период натурных наблюдений (2007—2014 гг.) оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро была осуществлена по биогенному стоку с речными водами, атмосферными осадками, подземными водами, разгружающимися в озеро, минуя речную сеть, антропогенному биогенному стоку с селитебных территорий и от сельско- и лесохозяйственных объектов (табл. 5).

Определение биогенного стока с селитебных территорий было проведено по химическому составу и объему ливневых и дренажных вод с этих территорий с учетом подземного стока. Атмосферные осадки учитывались по их ко-

Таблица 5

Диффузная биогенная нагрузка на Онежское озеро, сформированная на водосборе (по данным ИВП Севера КарНЦ РАН), т/год

Вид нагрузки	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Природная:		
речной сток,	497	8148
атмосферные осадки,	64	2240
подземные воды,	2.3	34.3
техногенные воды (фон)	4.0	68.2
Антропогенная		
поверхностный сток с селитебных территорий,	5.3	414
подземный сток с селитебных территорий,	0.03	26.4
свалки,	2.0	110
сельско- и лесохозяйственные объекты	70.2	988
Суммарная нагрузка	644.83	12028.9

Таблица 6

Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений

Диффузная нагрузка, сформированная на водосборе (т/год)	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Рассчитанная по модели ILLM (обеспеченность 50 %)	669	11981
Рассчитанная по данным наблюдений ИВП Севера КарНЦ РАН	645	12029

личеству, выпадающему на поверхность озера, и их составу для незагрязненных участков в бассейне озера. Для речных вод была определена фоновая концентрация в них биогенных элементов, что позволило установить природную речную нагрузку на озеро, а также вычислить нагрузку от сельскохозяйственных объектов.

В табл. 6 представлено сравнение результатов расчета биогенной нагрузки как по модели, так и по натурным данным, осредненным за период наблюдений (2007—2014 гг.). Удовлетворительное соответствие является подтверждением достоверности оценок обоими методами.

Таким образом, в результате выполненного исследования впервые разработана детерминировано-стохастическая модель (ДСМ) формирования стока и рассредоточенной (диффузной) нагрузки на Онежское озеро со стороны водосбора. Блок модели, описывающий вынос биогенных веществ с водосбора, усовершенствован за счет интегрирования в него детальной схемы расчета нагрузки, сформированной на сельхозпредприятиях. В качестве источника информации о структуре подстилающей поверхности водосбора удалось использовать результаты дешифрирования космических снимков. С помощью предложенной модели рассчитаны значения слоя стока с водосбора и нагрузки различной обеспеченности. Смоделированные значения нагрузки 50%-ной обеспеченности (669 тР/год и 11 981 тN/год) хорошо согласуются с данными, полученными специалистами ИВПС КарНЦ РАН на основе анализа многолетних наблюдений на притоках озера (645 тР/год и 12 029 тN/год).

Следует обратить особое внимание на перспективность комплексного использования данных контактных методов и дистанционного зондирования для совершенствования методов количественной оценки диффузной нагрузки на Онежское озеро с водосбора. Прогресс в указанном направлении связан с развитием трех взаимосвязанных научных направлений исследований:

1) развитие методов и моделей, описывающих формирование биогенной нагрузки на водосборе;

2) развитие системы наземного (контактного) мониторинга как совокупности методов измерения, оценки и прогноза;

3) развитие методов дистанционного зондирования с ориентацией на последующее использование результатов в задачах оценки выноса веществ с водосборов.

Следует отметить, что в диффузной биогенной нагрузке на Онежское озеро по модели не учитывается такой источник, как рыбоводческие хозяйства, расположенные на акватории озера и на водоемах его бассейна, хотя они и дают определенный вклад в биогенную нагрузку. В дальнейшем предполагается учесть в модели и рыбоводческие хозяйства.

Список литературы

- [1] Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1 (13). С. 78—85.
- [2] Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- [3] Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. С. 255.
- [4] 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, вып. 3. С. 21—26.
- [5] 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.
- [6] Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
- [7] Разработать методику и выполнить расчет диффузной нагрузки азота, фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности и потенциала ее снижения при использовании НДТ в сельском хозяйстве. Отчет о НИР. ИАЭП, 2015. 22 с.
- [8] Румянцев В. А., Кондратьев С. А. и др. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 93 с.
- [9] Шмакова М. В. Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока. Автореф. дис. СПб., 2000. 25 с.
- [10] HELCOM Baltic Sea Action Plan — Helsinki Commission Publ. Helsinki, Finland, 2007. 103 p.
- [11] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water) — HELCOM Publ. Helsinki, Finland, 2005. 80 p.

Поступило в редакцию
10 февраля 2016 г.

Nutrient load on Lake Onega from non-point sources according results of mathematical modeling

© S. A. Kondratyev,^{*1} M. V. Shmakova,^{*2} E. G. Markova,^{*3} P. A. Lozovik,^{**4}
A. Yu. Brukhanov,^{***5} E. F. Chichkova^{****6}

* Institute of Limnology RAS, St. Petersburg

** Northern Water Problems Institute Karelian Research center RAS, Petrozavodsk

*** Institute of Agroengineering and environmental problems of agricultural production, St. Petersburg

**** Research Central experimental-constructionistic and robotics and technical cybernetics institute,
St. Petersburg

E-mail: ¹ kondratyev@limno.org.ru

² m-shmakova@yandex.ru

³ adelmonamour@mail.ru

⁴ lozovik@nwpi.krc.karelia.ru

⁵ sznii@yandex.ru

⁶ chichkova@rtc.ru

For the first time a deterministic and stochastic model of runoff and non-point (diffuse) nutrient load on Lake Onega from the catchment area was developed. As a source of information about structure of catchment land surface the results of satellite images interpretation were used. Using the model the parameters of distribution of runoff and nutrient load on Lake Onega were calculated.

Key words: Lake Onega, models, catchment, nutrient load, satellite image.

References

- [1] Bryuxanov A. Yu., Shalavina E. V., Vasil'ev E'. V. Metodika ukрупnennoj ocenki su-tochnogo i godovogo vyxoda navoza/pometa // Molochnokozyajstvennyj vestnik. 2014. N 1 (13). S. 78—85.
- [2] Vinogradov Yu. B. Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniya stoka. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 312 s.
- [3] Kondrat'ev S. A. Formirovanie vneshnej nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya. SPb.: Nauka, 2007. S. 255.
- [4] Kondrat'ev S. A., Nazarova L. E., Bovykin I. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Vodnyj rezhim vodosbora Onezhskogo ozera pod vozdejstviem izmenenij klimata // Izv. RGO. 2008. T. 140, vyp. 3. S. 21—26.
- [5] Kondrat'ev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty // Regional'naya e'kologiya. 2011. 3—4. S. 50—59.
- [6] Onezhskoe ozero. Atlas / Otv. red. N. N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2010. 151 s.
- [7] Razrabotat' metodiku i vypolnit' raschet diffuznoj nagruzki azota, fosfora na vodosbor pri vedenii sel'skoxozyajstvennoj deyatel'nosti i potentsiala ee snizheniya pri ispol'zovanii NDT v sel'skom xozyajstve. Otchet o NIR, IAE'P, 2015. 22 s.
- [8] Rumyanцев V. A., Kondrat'ev S. A. i dr. Opyt razrabotki i primeneniya matematicheskix modelej bassejnov malyx rek. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 93 s.
- [9] Shmakova M. V. Stokasticheskaya Model' Pogody v sisteme determinirovano-stokasticheskogo modelirovaniya xarakteristik stoka. Avtoref. dis. SPb., 2000, 25 s.
- [10] HELCOM Baltic Sea Action Plan — Helsinki Commission Publ. Helsinki, Finland, 2007. 103 p.
- [11] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water) — HELCOM Publ. Helsinki, Finland, 2005. 80 p.