

УДК 574.58.001.573+519.6

ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

© 2009 К.А. Подгорный

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок, Ярославская обл.; e-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

Рассматривается общее описание пространственно-неоднородной имитационной модели экосистемы Невской губы Финского залива. Приводятся результаты модельных экспериментов и сравнение их с данными наблюдений.

Ключевые слова: экосистема, биогенные элементы, гетеротрофный бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, детрит, пищевая цепь, математическое моделирование, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования. Невская губа Финского залива – сложная водная экосистема, причем сложная и для проведения полевых экологических исследований, и для разработки математических моделей. Своеобразие Невской губы обусловлено целым рядом причин:

- на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком р. Невы поступают в Невскую губу в объеме ~2400-2500 м³/с [5, 8, 9, 12, 13, 21, 23-26];
- кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5-6 сут., а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее [5, 6, 8, 9];
- Невская губа – мелководный водоем с преобладающими глубинами 3-5 м, интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации [5, 6, 8, 9, 25];
- велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ;
- Невская губа - район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду [1, 5, 6, 8, 9, 12-14, 19, 21, 23-26];
- на экосистему Невской губы оказывает влияние строящийся комплекс водозащитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений [6, 10, 15].

Вследствие совместного действия перечисленных факторов Невской губе свойственна чрезвычайно высокая пространственно-временная изменчивость качества воды. К настоящему времени за более чем столетний период наблюдений накоплен огромный фактический материал

данных наблюдений за состоянием экосистемы Невской губы. Имеется определенный опыт разработки математических моделей различного типа и назначения, создания интегрированной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области [3, 4, 8, 11, 13, 16, 20, 22, 26].

Цели работы состояли в том, чтобы:

- на основе всестороннего системного анализа данных наблюдений и сведений, опубликованных в литературных источниках, разработать имитационную, пространственно-неоднородную модель экосистемы Невской губы;
- путем численных экспериментов исследовать наиболее важные закономерности трансформации и круговорота соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода, количественно оценить процессы, определяющие продукционный потенциал Невской губы.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

В имитационной модели экосистемы Невской губы были выделены, разработаны и программно реализованы следующие основные ее блоки:

- гидродинамический - для расчета нестационарной, осредненной по вертикали структуры течений в водоемах;
- гидротермодинамический - для расчета фотопериода, составляющих теплового баланса и температурного режима водоема;
- гидрооптический - для расчета оптических характеристик водной толщи;
- блок для описания процессов трансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода¹;
- блок для расчета времени оборота и потоков вещества между выделенными (агрегированными) модельными компонентами экосистемы;

- блок для выполнения процедуры оценивания параметров имитационной модели.

Воды Невской губы почти всегда перемешаны до дна, в ней отсутствует выраженный сезонный термоклин и имеет место относительная вертикальная однородность (однослойная структура) течений. Поэтому при моделировании пространственно-временной структуры течений использовано приближение теории мелкой воды. Значения средних по глубине составляющих скорости течения определяются в результате численного интегрирования системы уравнений Сен-Венана без учета турбулентного перемешивания [2, 18]. Для численного решения используется неявная, разнесенная по пространству и времени разностная схема с применением метода переменных направлений [2, 18]. Вычисления полей течений в модели проводились на равномерной прямоугольной сетке с размером шага 500×500 метров. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений для обеспечения устойчивости вычислений был выбран равным 30 сек. Общее число узлов расчетной сетки 53 × 36. Вычисления полей течений начинались от момента очищения Невской губы ото льда и продолжались до 31 октября. Изменение гидрометеорологической ситуации над водоемом происходило каждые сутки модельного времени.

Моделирование проводилось как для естественных, так и для проектных условий, т. е. при наличии комплекса водозащитных сооружений города г. Санкт-Петербурга от наводнений. В проектных условиях Северные и Южные ворота Невской губы перекрыты дамбами, в которых имеется шесть водопропускных отверстий (В1 – В6) и два судопропускных отверстия (С1, С2). Расходы р. Невы (1900 м³/с), р. Малая Нева (400 м³/с) и р. Малая Невка (300 м³/с) задавались по данным многолетних наблюдений [5, 9]. Площади водопропускных и судопропускных отверстий заданы по данным работы [10]. Принималось, что в проектных условиях 54% расхода проходит через Северные ворота, а 46% - через Южные ворота [22]. Соответственно этим данным, вычислялись скорости течений в водопропускных и судопропускных отверстиях.

Для моделирования пространственно-временной динамики полей температуры используется уравнение теплопроводности [18]. Из этого уравнения следует, что эволюция температурного поля водоема определяется тремя основными факторами: адвективным переносом тепла; тур-

булентной диффузией; процессами теплообмена между водоемом, атмосферой и деятельным слоем донных отложений. В качестве граничных условий при построении численной схемы на всей твердой границе, в створах вытекающих рек и на открытой границе при направлении движения воды за пределы расчетной области задавалось условие равенства нулю производной по направлению внешней нормали к границе водоема. На открытой границе при направлении движения воды внутрь расчетной области ставилось первое краевое условие. В створах втекающих рек задавалось значение температуры воды втекающей реки в данный момент времени.

Задача моделирования термического режима Невской губы решается в два основных этапа. Сначала на заданном шаге по времени τ проводится численное интегрирование системы уравнений гидродинамики – уравнений «мелкой воды». В результате этого определяются значения средних по глубине составляющих скорости течения. Затем на том же временном интервале интегрируется уравнение теплопроводности. При этом применяются схемы расщепления по физическим процессам и пространственным координатам [18]. В результате решения этой задачи находят пространственное распределение температуры в пределах расчетной области к концу заданного шага по времени. Схемы численного интегрирования указанных выше уравнений, методика расчета фотопериода, тепловых потоков на поверхности водоема при различных условиях стратификации приводного слоя воздуха и варианты расчета потока тепла на дне водоема подробно рассмотрены в работах [17, 18].

Расчет полей температуры, как и расчет течений, проводился на той же самой равномерной прямоугольной сетке с размером шага 500 × 500 м. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений составлял 120 сек. Начальное значение температуры воды по всей акватории было равно 0,5°. При выполнении расчетов в соответствующих узлах расчетной сетки задавался известный из наблюдений временной ход температуры воды в реках. Расчеты тепловых потоков в приводном слое атмосферы проводились на основе многолетних данных стандартных метеорологических наблюдений Санкт-Петербургской ГМО в предположении равновесной стратификации приводного слоя воздуха.

Задача моделирования динамики пространственно-неоднородной водной экосистемы решается в два основных этапа. Сначала на заданном шаге по времени τ проводится численное интегрирование системы уравнений термогидродинамики. В результате моделирования гидрологического комплекса определяются значения средних

¹ При разработке этого блока модели большая помощь была оказана ведущим научным сотрудником Института океанологии РАН, д.х.н. А.В. Леоновым, которому автор приносит свою искреннюю благодарность.

по глубине составляющих скорости течения, потоков коротковолновой солнечной радиации, величины фотопериода и средней по вертикали температуры воды. Затем на том же временном интервале (в данном случае 120 сек., как и при расчете поля температуры) и на той же самой пространственной сетке численно интегрируется система уравнений турбулентной диффузии и трансформации веществ химико-биологического комплекса. Решение этой задачи позволяет найти значения концентраций биотических компонентов экосистемы к концу заданного шага по времени. Эволюция полей химических и биологических характеристик определяется воздействием четырех основных факторов: переносом субстанций вдоль траекторий частиц (адвекцией); гравитационным осаждением взвешенных веществ; турбулентной диффузией; трансформацией химико-биологических субстанций. Для численного интегрирования применяются схемы расщепления по физическим процессам и пространственным координатам, которые подробно рассмотрены в работе [18].

В качестве граничных условий при построении численной схемы на всей твердой границе, в створах вытекающих рек и на открытой границе при направлении движения воды за пределы расчетной области задавалось условие равенства нулю производной по направлению внешней нормали к границе водоема. На открытой границе при направлении движения воды внутрь расчетной области ставилось первое краевое условие. В створах втекающих рек задавались значения концентраций химических и биотических компонентов в воде реки в данный момент времени.

Имитационная модель совместной трансформации соединений азота и фосфора, а также динамики растворенного в воде кислорода учитывает основные взаимодействия как природных, так и антропогенных факторов, их совместное влияние на водную экосистему. В этом блоке имитационной модели рассматриваются 17 переменных состояния: концентрации растворенных фракций органического азота и фосфора, неорганического фосфора, аммонийного, нитритного, нитратного азота, азота и фосфора в составе детрита, концентрация растворенного в воде кислорода, биомассы гидробионтов (гетеротрофных бактерий, фитопланктона, простейших и зоопланктона) в единицах азота (N) и фосфора (P).

В водной среде присутствуют органические и минеральные соединения биогенных элементов. Различные микроорганизмы потребляют их и своими прижизненными выделениями, а также образованием детрита влияют на состав компонентов водной среды. Наиболее важные взаимодействия между химическими и биологически-

ми компонентами отражают круговорот рассматриваемых в модели биогенных элементов. При моделировании трансформации форм N и P эти взаимодействия учтены на основе реалистичного описания кинетики и стехиометрии процессов биотрансформации веществ. Кроме этого учтено влияние факторов среды обитания (температура, освещенность водной среды, изменение водной и биогенной нагрузки) на скорость трансформации отдельных соединений.

В модели биотрансформации химических веществ количественно связываются скорости роста гидробионтов с концентрациями биогенных элементов. При этом различные компоненты одного элемента могут рассматриваться как взаимозаменяемые вещества, потребляемые гидробионтами в процессе их развития. Математическая формулировка отдельных слагаемых модели для описания процессов потребления веществ микроорганизмами, выделения ими продуктов обмена и отмирания гидробионтов выполнено с учетом условий полисубстратной среды. При математическом описании процессов учтена гипотеза о предпочтении потребления отдельных соединений. Это позволяет отразить смену биогенного элемента или его отдельных соединений в лимитировании развития гидробионтов. Таким образом, модель фактически воспроизводит переходные процессы и описывает реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания или на изменение хотя бы одного из учитываемых в модели факторов (изменение температуры воды, водного режима, освещенности, биогенной нагрузки). Полное описание модели дано в работе [18].

С помощью данной модели можно изучать пространственно-временную динамику сестона, который является одним из наименее изученных факторов водной среды. Сестон - совокупность взвешенных в воде минеральных и органических частиц. Содержание его в воде определяет такое важное свойство природной воды, как прозрачность. Модель позволяет выполнять расчет различных характеристик прозрачности воды [18]. Для этого используется ряд эмпирических зависимостей, которые были получены на основе данных натурных измерений [12, 18].

Для решения оптимизационной задачи подбора параметров имитационной модели реализован двухэтапный алгоритм прямого поиска [18]. На первом этапе используется алгоритм случайного поиска, который проводится в пределах всего пространства параметров (глобально). Его задача состоит в отыскании возможной области существования глобального минимума целевой функции в заданном параметрическом пространстве. На втором этапе выполняется локальный

поиск. Для этого используется модифицированный симплексный метод Нелдера-Мида [27]. Локальный поиск уточняет положение минимума целевой функции, найденное на первом этапе работы алгоритма.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование проводилось для четырех лет наблюдений – с 1984 по 1987 г. Результаты моделирования позволяют говорить о достаточно хорошем качественном и количественном соответствии модельных оценок и имеющихся данных наблюдений. В качестве показателя адекватности модели используется критерий Тила [28], значение которого может меняться от нуля до единицы, причем при полном совпадении модельных и наблюдаемых величин его значение равно нулю. Сравнение полей температуры показывает, что для них критерий Тила меняется в пределах от 0,0307 до 0,2093 при среднем значении 0,0781. Средние по биотическим компонентам величины этого критерия меняются от 0,2306 до 0,3778 при среднем значении 0,2812. Наибольшие расхождения отмечаются для мая месяца, что может быть связано с ошибками в задании начальных полей модельных компонентов экосистемы. Во взвешенном органическом веществе азот и фосфор в составе детрита составляют 45-75%, 10-30% – азот и фосфор в составе фитопланктона и 10-20% – азот и фосфор в составе гетеротрофных бактерий. Роль зоопланктона в Невской губе невелика. Основной фракцией минерального азота является азот нитратов – 60-70%. Азот нитритов составляет менее 5%. Отношение $N_{\text{мин}}/DIP$ менялось от 30 до 190, $N_{\text{орг}}/P_{\text{орг}}$ – от 16 до 40, $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ – от 23 до 49, а их внутригодовая динамика качественно отличалась от года к году. С помощью модели оценены пределы изменчивости важнейших компонентов экосистемы: DIP – 2,02-20,08 (мкг/л); DOP – 1,30-12,25 (мкг/л); PD – 19,60-35,06 (мкг/л); $N-NH_4^+$ – 31,96-191,97 (мкг/л); $N-NO_2^-$ – 4,50-18,14 (мкг/л); $N-NO_3^-$ – 160,05-468,20 (мкг/л); DON – 237,87-943,41 (мкг/л); ND – 196,04-400,12 (мкг/л). Эти результаты также согласуются с данными многолетних наблюдений [21, 23-25]. С помощью модели и данных наблюдений показано, что содержание азота и фосфора в воде Невской губы, по всей видимости, не может быть лимитирующим фактором, сдерживающим увеличение биопродуктивности водоема. На это указывает несоответствие между сравнительно низким уровнем развития фитопланктона при достаточно высоких концентрациях биогенных элементов. Вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества не-

велик. Результаты моделирования и данные наблюдений [1, 6, 7, 12] показывают, что основной причиной интенсивного развития гетеротрофных процессов в Невской губе являются величины аллохтонного органического вещества. Влияние комплекса защитных сооружений в целом невелико и прослеживается только на нескольких шагах расчетной сетки (в среднем до 5-10 шагов в зависимости от ветровых условий). Однако данный вопрос еще требует более детального исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-05-00470).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф., Никулина В.Н., Панов В.Е., Телеш И.В., Финогенова Н.П. Гидробиологическая характеристика Невской губы Финского залива // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 3. С. 3-14.
2. Баклановская В.Ф., Пальцев Б.В., Чечель И.И. О краевых задачах для системы уравнений Сен-Венана на плоскости // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, №3. С. 708-725.
3. Андреев О.А., Соколов А.В. Численное моделирование динамики вод и переноса пассивной примеси в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1989. № 12. С. 78- 5.
4. Афанасьев С.В. Результаты численных экспериментов по моделированию распространения примеси в Невской губе // Системы и методы автоматизации исследований и управления. М.: Наука, 1982. С. 30- 4.
5. Гидрология устьевой области Невы / Под ред. С.С. Байдина. - М.: Гидрометеиздат. 1965. 384 с.
6. Дробкова В.Г., Беляков В.П., Каурова З.Г. Особенности процессов антропогенного эвтрофирования в эстуарии р. Невы (восточная часть Финского залива) // Биол. внутр. вод. 1999. №1-3 С. 58-69.
7. Дробкова В.Г., Каурова З.Г., Хлопотина Н.Л. Особенности гетеротрофной активности бактериопланктона в эстуарии р. Невы (Невская губа и восточная часть Финского залива) // Гидробиол. журн. 2000 Т. 36, №6. С. 52-61.
8. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений / Под ред. А.Ф. Алимова, Л.А. Руховца, М.М. Степанова. - СПб.: Vorey Print, 2001. 420 с.
9. Исследования водной системы Ладожское озеро - река Нева - Невская губа и Восточная часть Финского залива // Тр. ГГИ. 1988. Вып. 321. 152 с.
10. Клеванный К.А. Наводнения в Санкт-Петербурге при незавершенном комплексе защитных сооружений // Изв. АН. Серия географическая.

2002. №2. С. 80 - 88.
11. Менишуткин В.В., Гришман З.М., Пинчук Н.М. Концептуальная модель экосистемы Невской губы // Физиол. человека. 1993. Т. 19, №6. С. 126 - 136.
 12. Невская губа: гидробиологические исследования / Под ред. Г.Г. Винберга, Б.Л. Гутельмахера. – Л.: Наука, 1987. 216 с.
 13. Невская губа - опыт моделирования / Под ред. В.В. Менишуткина. - СПб.: Vorey Print, 1997. 375 с.
 14. Никулина В.Н. Сезонная динамика фитопланктона мелководного района восточной части Финского залива при антропогенном воздействии // Биология внутренних вод, 2003. №4. С. 43 - 50.
 15. Никулина В.Н., Большакова В.А. Фитопланктон эстуария р. Невы в зоне строительства сооружений защиты г. Санкт-Петербурга от наводнений // Гидробиол. журн. 1998. Т. 34. №1. С. 25 - 33.
 16. Пинчук Н.М., Гришман З.М., Дитятев А.Э., Евдокимов И.И., Левченко В.Ф., Менишуткин В.В. Исследование и прогнозирование экологического состояния Невской губы и восточной части Финского залива методами имитационного моделирования // Физиол. человека. 1992. Т. 18. №5. С. 131 - 135.
 17. Подгорный К.А. Расчет параметров термодинамического взаимодействия, характеристик теплового баланса и температуры воды в нестратифицированных водоемах. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2000. 100 с.
 18. Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). – Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати». 2003. 328 с.
 19. Подгорный К.А., Смирнова Н.Ф. Распределение токсических веществ в Невской губе за период с 1984 по 1987 гг. // “Гидрология Южного океана и Северной Атлантики”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛГМИ. 1990. Вып. 109. С. 130 - 139.
 20. Пясковский Р.В., Молчанов В.Н. Моделирование динамического переноса загрязняющих веществ в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1976. №3. С. 68 - 77.
 21. Румянцева Э.А., Скакальский Б.Г. Оценка временной и пространственной неоднородности вод Невской губы и восточной части Финского залива по гидрохимическим показателям // Метеорол. и гидрология. 2008. №1. С. 98 - 106.
 22. Руховец Л.А. Математическое моделирование водообмена и распространения примесей в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1982. №7. С. 78 - 87.
 23. Скакальский Б.Г., Румянцева Э.А. Гидрохимическое районирование Невской губы // Метеорол. и гидрология. 1989. №9. С. 110 - 113.
 24. Смирнова Н.Ф. Особенности структуры вод Невской губы в период 1979-1983 гг. // “Вопросы охраны и рационального использования вод суши”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1985. Вып. 89. С. 51 - 57.
 25. Смирнова Н.Ф., Подгорный К.А. Пространственно-временные изменения структуры вод Невской губы за период с 1984 по 1987 гг. // “Динамика русловых потоков и охрана природных вод”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛГМИ. 1990. Вып. 107. С. 136 - 149.
 26. Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы / Под ред А.Ф. Алимова, А.К. Фролова. – СПб: Научный центр РАН. 1996. 225 с.
 27. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Comp. J. 1964. V. 7. P. 308 - 313.
 28. Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland 1971. 474 p.

A TWO-DIMENSIONAL SIMULATION ECOSYSTEM MODEL OF THE NEVA BAY, GULF OF FINLAND

© 2009 K.A. Podgornyj

I.D. Papanin Institute for the Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences
Borok, Yaroslavl region; e-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

The paper presents a generic description of a two-dimensional simulation ecosystem model of the Neva bay, Gulf of Finland. A result of model experiments was validated with concurrent field observations.

Key words: *ecosystem, biogenic elements, heterotrophic bacterial plankton, phytoplankton, zooplankton, detritus, food chain, mathematical modeling, simulation model.*