

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ
ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ
БИОТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА, ФОСФОРА
И ДИНАМИКИ РАСТВОРЕННОГО В ВОДЕ КИСЛОРОДА В ЭКОСИСТЕМЕ
НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА. 2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ РАСЧЕТОВ, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ¹**

© 2013 г. К. А. Подгорный*, А. В. Леонов**

* *Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
152742 Ярославская обл., Некоузский р-он, пос. Борок
E-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru*

** *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: leonov@ocean.ru*

Поступила в редакцию 21.06.2011 г.

Собранная информация для расчетов на модели систематизирована для естественных и проектных условий. Естественные условия не учитывали влияния комплекса водозащитных сооружений на гидрологический режим Невской губы и на биогенную нагрузку на эту акваторию, а проектные условия, напротив, отражали возможное воздействие этих сооружений на гидрологию и экологию данной акватории. На основе численных экспериментов исследованы процессы трансформации соединений N и P, а также динамики растворенного в воде O₂ в акватории Невской губы. При сопоставлении расчетных и наблюдаемых концентраций биогенных веществ рассчитаны значения критерия Тейла для оценки адекватности модели в воспроизведении концентраций полей распределения биогенных веществ по акватории Невской губы. Выявлены основные качественные и количественные особенности формирования пространственной неоднородности и временной изменчивости концентраций соединений биогенных элементов по акватории Невской губы. Намечены возможные усовершенствования модели в воспроизведении комплекса процессов, особенно важных для развития трансформации веществ в мелководных экосистемах.

Ключевые слова: экосистема, биогенные элементы, гетеротрофный бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, детрит, трофическая цепь, математическое моделирование, экологическая имитационная модель Невской губы (Финский зал.)

DOI: 10.7868/S0321059613030073

В этой работе не ставилась задача исследовать тонкие механизмы переноса веществ от мест водовыпусков очистных сооружений. Для решения таких задач надо применять более сложные, трехмерные математические модели и сетки с мелким шагом по пространству (или даже криволинейные сетки), которые позволяют детально изучать пространственно-временное распространение загрязнений по акватории от их источников (примеры таких расчетов имеются в [15]). Для подобных расчетов и исследований нужны соответству-

ющие данные наблюдений, выполняемые по более густой сетке станций в сравнении с имеющейся сейчас для Невской губы. Должна быть иной и временная дискретность подобных наблюдений. Основная задача данного этапа построения модели — системно исследовать и выявить наиболее важные механизмы поведения экосистемы Невской губы (в целом и на отдельных участках) в течение вегетационного сезона. При этом следовало учитывать и качество, и количество имеющейся исходной информации (особенно — гидробиологических данных) для разработки модели. Выбранный на данный момент пространственный шаг сетки 500 м представляется вполне разумным для этапа

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-13510-офи_ц).

проверки адекватности модели и ее работоспособности в целом. Он в определенной мере должен соответствовать пространственной дискретности станций наблюдений в Невской губе. При недостаточной точности и сравнительно небольшом объеме наблюдений нет особенного смысла строить подробную модель гидротермодинамических процессов и использовать сетки с небольшим шагом по пространству (это значительно увеличит затраты машинного времени в процессе счета, а точность расчетов не сможет превзойти точности данных наблюдений).

Моделирование проводилось для естественных и проектных условий, учитывающих наличие комплекса водозащитных сооружений (КЗС) г. Санкт-Петербурга от наводнений. В проектных условиях Северные и Южные¹ ворота Невской губы перекрыты дамбами, в которых имеется шесть пропускных проходов для воды (В1–В6) и два – для судов (С1, С2) (рис. 1). Расходы воды рек Невы, Малой Невы и Малой Невки (соответственно 1900, 400 и 300 м³/с) задавались по данным многолетних наблюдений [2, 5], а площади водо- и судопропускных проходов – по информации из [6]. Принималось, что в проектных условиях 54% обмена водными ресурсами осуществляется через Северные ворота, а 46% – через Южные ворота [14]. Соответственно этим данным вычислялись скорости течений для водо- и судопропускных проходов. Расчетные области моделирования для естественных и проектных условий показаны на рис. 1.

Расчеты по Гидродинамическому и Гидротермическому блокам модели проводились на основе многолетних данных стандартных срочных метеорологических наблюдений Санкт-Петербургской ГМО. Для вычислений необходимы следующие характеристики: скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, величина приземного атмосферного давления, сведения об облачности.

Исходным материалом для расчетов в Биогидрохимическом блоке модели послужили данные систематических синхронных гидрологических, гидрохимических и гидробиологических съемок, выполняемых Северо-Западным территориальным управлением по гидрометеорологии (СЗУГКС) на

¹ Акватории к северу и югу от о. Котлин давно получили названия соответственно “северная” и “южная”. Через эти акватории осуществляется водообмен с Финским зал. Эти названия были даны и воротам при строительстве КЗС. Авторы статьи эти названия в работе сохранили, хотя применительно к воротам эти названия не точны: водообмен через Южные ворота ориентирован в направлении запад ↔ восток, а через Северные – в направлении север ↔ юг.

постоянной сетке станций для контроля экологического состояния окружающей среды [18]. Гидробиологические и гидрохимические наблюдения в 1984–1987 гг. проводились с мая по октябрь раз в месяц, а гидробиологические – три раза за вегетационный период. Комплексные измерения характеристик водной среды выполнялись на фиксированных станциях, количество которых менялось от 18 до 24. Располагались они во всех наиболее характерных зонах акватории Невской губы, а также на речных участках. Для сравнительной оценки и дополнительного контроля результатов моделирования использовались также данные наблюдений на тех же станциях, полученные сотрудниками Зоологического института РАН [8]. Поступление биогенных веществ (БВ) со стоком основных рек, втекающих в Невскую губу, учитывалось по информации из обзоров состояния и ежегодников качества морских вод за 1984–1987 гг.

Оценка влияния сбрасываемых в Невскую губу загрязненных сточных вод выполнялась по данным [9]. К 1980 г. из всех источников загрязняющих веществ, переносимых р. Невой и поступающих затем в Невскую губу, решающая роль принадлежала стоку воды из Ладожского оз. и сточным водам г. Санкт-Петербурга – со станций аэрации Центральной (ЦСА) и Северной (ССА). Водоотведение города характеризовалось следующими данными: для хозяйственно-бытовых и производственных загрязненных вод – по 1.3, производственных условно чистых вод – 2.6 млн м³/сут.

Помимо Санкт-Петербурга, восточнее строящегося КЗС имеются дополнительные источники загрязненных стоков в Невскую губу – Юго-западная станция аэрации (ЮЗСА, Стрельна) и некоторые населенные пункты (Петродворец, Ломоносов, Кронштадт, Лисий Нос). Суммарный объем хозяйственно-бытовых и производственных загрязненных сточных вод к 1980 г. составлял ~0.1 млн м³/сут.

Согласно генеральному плану строительства канализации все хозяйственно-бытовые и производственные загрязненные сточные воды г. Санкт-Петербурга должны направляться по сети тоннельных коллекторов ЦСА (о. Белый) с рассеивающими выпусками в Невскую губу. Динамика предполагаемого роста производительности указанных очистных сооружений и их состояние на момент проведения расчетов на модели характеризовались следующими средними показателями (для 1985/2000 гг., млн м³/сут): ССА (пос. Ольгино) – 2.0/2.0; ЦСА (о. Белый) – 1.5/1.5; ЮЗСА (пос. Стрельна) – 0.5/1.5; всего – 4.0/5.0.

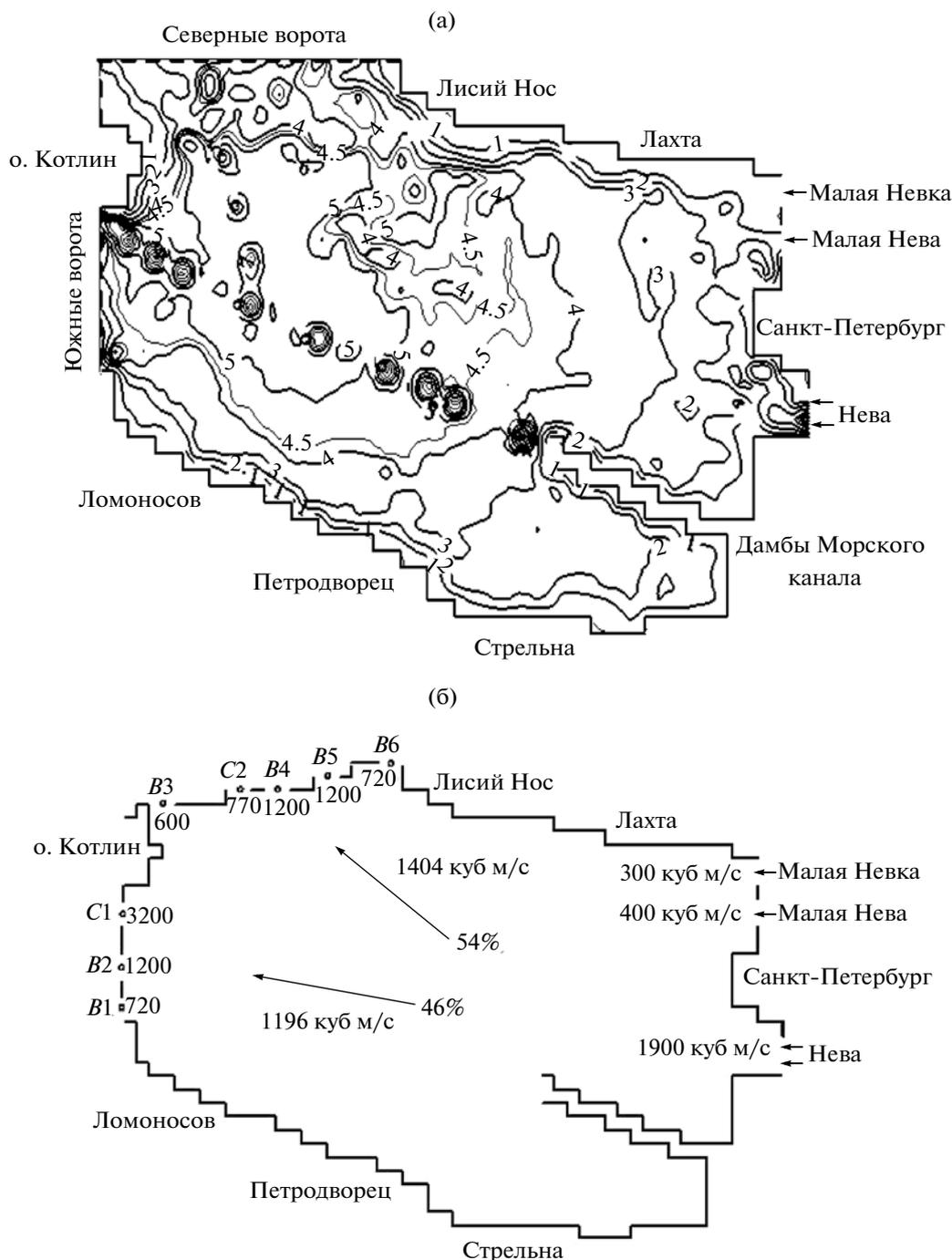


Рис. 1. Расчетные области моделирования для естественных (а) и проектных (б) условий. Изолинии на рис. 2а – глубины, м. На рис. 2б цифры около водо- (В1–В6) и судопропускных (С1, С2) ворот – площади, м².

В [9] для трех створов Невской губы и различных сезонов проведены специальные расчеты по оценке среднесезонного (за 1969–1979 гг.) стока растворенных органических и неорганических БВ. Из этих расчетов при построении модели стало возможным получить и данные для среднесезонных концентраций O_2 и растворенных

БВ, поступающих в губу из некоторых очистных сооружений. Так, створ 1 (входной для Невской губы) в расчетах включал четыре рукава: Большая и Средняя Невка, Малая Нева и Малая Невка, Большая Нева, Морской канал (соответственно створы 1А, 1Б, 1В, 1Г). В створ 1 были включены также расходы воды по канализационным стан-

Таблица 1. Концентрация растворенных веществ в водах Невской губы (среднеголетние значения за 1969–1979 гг.) [9]

Номер створа	Среднее за год	Зима, XII–III	Лето, VI–IX	Номер створа	Среднее за год	Зима, XII–III	Лето, VI–IX
Растворенный O ₂ , (мг O ₂ /л)/(мл O ₂ /л)				Фосфор общий, мг P/л			
1	11.8/8.3	13.2/9.2	9.9/6.9	1	0.118	0.116	0.120
2	10.8/7.6	11.5/8.1	9.6/6.7	2	0.116	0.114	0.118
3	11.2/7.8	12.1/8.5	9.8/6.9	3	0.112	0.113	0.111
БПК ₅ , мг O ₂ /л				Фосфор минеральный (P-PO ₄ ³⁻), мг P/л			
1	2.6	3.0	2.3	1	0.028	0.041	0.015
2	2.1	2.4	1.9	2	0.028	0.041	0.015
3	1.8	2.1	1.7	3	0.028	0.041	0.015
Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /л				Кремний Si, мг Si/л			
1	9.2	10.0	8.6	1	0.31	0.40	0.24
2	8.5	8.8	8.2	2	–	–	–
3	8.2	8.6	7.9	3	0.29	0.38	0.22
Азот аммонийный (N-NH ₄ ⁺), мг N/л				Железо Fe, мг Fe/л			
1	0.36	0.49	0.28	1	0.22	0.22	0.22
2	0.32	0.45	0.24	2	–	–	–
3	0.29	0.42	0.21	3	0.20	0.20	0.20
Азот нитритов (N-NO ₂ ⁻), мг N/л				Азот нитратов (N-NO ₃ ⁻), мг N/л			
1	0.004	0.003	0.004	1	0.165	0.195	0.142
2	0.006	0.005	0.008	2	0.122	0.157	0.095
3	0.005	0.004	0.006	3	0.122	0.157	0.095

циям. Три из них (1а, 1б, 1в) относились к ЦСА, а две другие (1г, 1д) – к ЮЗСА. Среднеголетние расходы воды по рукавам Невской дельты и канализационным насосным станциям составляют: для 1А – 250 м³/с; 1Б – 710; 1В – 1110; 1Г – 430; 1а – 1.0; 1б – 0.4; 1в – 8.5; 1г – 0.5 и 1д – 0.6 м³/с.

Концентрации O₂ и БВ в створе 1 в Невской губе вычислялись в виде средневзвешенных значений по расходу воды согласно следующей формуле [9]:

$$C_1 = \frac{1}{Q_1} ((Q_1 - q_1) \bar{C}_{Q_1} + q_1 \bar{C}_{q_1}),$$

здесь Q_1 – суммарный расход воды в четырех главных рукавах р. Невы (при выходе ее на Невский бар):

$$Q_1 = Q_{1A} + Q_{1B} + Q_{1V} + Q_{1Г},$$

q_1 – суммарный расход воды по пяти канализационным станциям:

$$q_1 = q_{1a} + q_{1б} + q_{1в} + q_{1Г} + q_{1д},$$

\bar{C}_{Q_1} – средневзвешенная концентрация вещества по четырем рукавам р. Невы:

$$\bar{C}_{Q_1} = \frac{1}{Q_1} (Q_{1A} C_{1A} + Q_{1B} C_{1B} + Q_{1V} C_{1V} + Q_{1Г} C_{1Г}),$$

\bar{C}_{q_1} – средневзвешенная концентрация вещества по пяти канализационным насосным станциям:

$$\bar{C}_{q_1} = \frac{1}{q_1} (q_{1a} C_{1a} + q_{1б} C_{1б} + q_{1в} C_{1в} + q_{1Г} C_{1Г} + q_{1д} C_{1д}).$$

Таким образом, зная расходы воды и среднеголетние концентрации соответствующих БВ для различных периодов года, нетрудно выполнить дополнительный расчет и оценить среднее за соответствующий сезон поступление БВ в акваторию губы от ЦСА и ЮЗСА. По данным [8] и обзоров гидрохимического состояния и качества воды Невской губы за 1984–1987 гг. получены также средние за сезон оценки поступлений БВ из ССА.

В табл. 1 приведены расчетные среднегодовые и среднесезонные концентрации различных растворенных БВ на трех поперечных створах Невской губы. Эти данные – достаточно полное

представление о химическом составе воды, а также о стоке и балансе растворенных веществ в губе за 1969–1979 гг.

Оценки значений параметров, которые используются для расчета полей течений и T_w с помощью Гидродинамического и Гидротермического блоков модели, приведены в [10–12, 20]. Подбор параметров для Биогидрохимического блока имитационной модели проводился предварительно с помощью алгоритмов вспомогательного блока, который в автоматическом режиме позволяет выполнять процедуры оценивания эмпирических параметров имитационной модели по имеющимся наблюдениям. Такая оценка параметров проводилась каждый раз заново, отдельно для 1984, 1985, 1986 и 1987 гг. на основе той конкретной информации, которая имела для определенного года наблюдений. Найденные для каждого года значения параметров были одинаковыми для всех внутренних узлов сеточной области и для всего периода проведения полного комплекса расчетов для данного года.

Для каждого года было выполнено по 20 вычислительных экспериментов, связанных с поиском наилучшего набора эмпирических параметров для Биогидрохимического блока имитационной модели. Это было сделано для того, чтобы ответить на ряд следующих методических вопросов:

- насколько статистически близкими оказываются найденные значения параметров модели для каждого года в отдельности;

- имеются ли статистически достоверные межгодовые отличия в значениях параметров, или же для разных лет можно использовать одинаковый набор параметров;

- надо ли проводить специальные исследования чувствительности модели к изменению значений тех или иных параметров.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что для каждого года в отдельности алгоритмы поиска параметров дают их значения, статистические различия между которыми не достоверны. Это свидетельствует о достаточно хорошей сходимости применяемых методов поиска. В то же время установлено, что в значительном количестве случаев существуют статистически достоверные межгодовые различия между средними и/или дисперсиями значений тех или иных параметров, причем в разные годы могут достоверно отличаться статистические характеристики разных параметров. Кроме того, показано, что и наиболее высокая чувствительность модели к из-

менению значений параметров в разные годы также связана с разными параметрами.

После процедуры подбора параметров Биогидрохимического блока проводился полный комплекс расчетов (для периода от момента очищения Невской губы ото льда до 31 октября) с сохранением всей расчетной информации. При этом каждый раз для всех переменных модели в качестве входных данных на определенный момент времени использовались свои данные наблюдений, относящиеся к конкретному году, по которому проводились расчеты.

Результаты расчетов можно сохранять в виде: графических файлов с пространственным распределением концентраций по каждому компоненту модели на определенный момент времени; текстовых файлов, содержащих статистическую информацию; а также в виде значений переменных модели в каждом узле сеточной области. Текстовые файлы, если в этом есть необходимость, можно затем использовать в других прикладных программах (таких, например, как Surfer, Statistica, Grapher, Excel, Quattro Pro) для дополнительной обработки информации. На основе сохраняемых графических файлов можно визуально проследить динамику всех важнейших характеристик экосистемы и то, как происходит изменение полей модельных компонентов в течение рассматриваемого периода с тем или иным шагом по времени в зависимости от изменения параметров окружающей среды (сток р. Невы, гидрометеорологические условия, нагрузка по БВ и другие критерии).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Расчеты на модели проводились по наблюдениям в 1984–1987 гг. (период первой фазы строительства КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений). Результаты моделирования пространственно-временной динамики полей течений и T_w в Невской губе рассматривались в [12, 20]. В данной работе представлены для этих лет только основные результаты моделирования процессов трансформации форм N и P, а также растворенного O_2 , показаны пространственно-временные особенности их динамики по акватории Невской губы.

Пространственно-временная изменчивость концентраций соединений N

Данные моделирования показывают, что в течение 1984–1987 гг. средние по акватории Невской губы концентрации NH_4^+ с мая по октябрь менялись в достаточно широких пределах – от 10

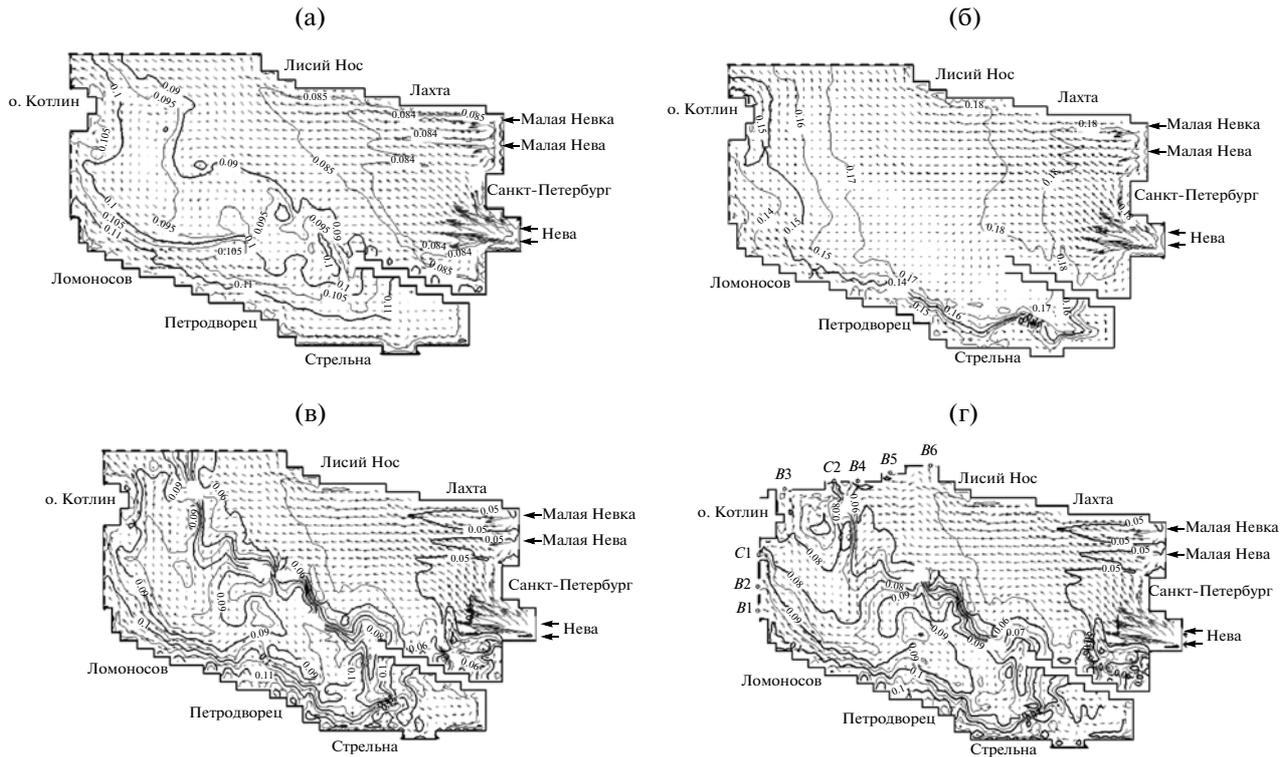


Рис. 2. Примеры пространственного распределения расчетных концентраций NH_4^+ , мг N/л, в пределах акватории Невской губы: (а)–(в) – для естественных условий (соответственно на 08.08.1985 г., 15.07.1986 г. и 20.10.1987 г.); (г) – для проектных условий на 20.10.1987 г. Здесь и на рис. 3–4 стрелки показывают рассчитанные по уравнениям Гидродинамического блока поля течений.

до 200 мкг N/л. Максимальные концентрации в начале августа 1984 г. превышали 300 мкг N/л. Минимальные концентрации NH_4^+ в мае, первой декаде июня и второй половине октября снижались до <15 мкг N/л и даже достигали нулевых значений. Внутри- и межгодовая динамика NH_4^+ отличалась большим разнообразием – средний размах колебаний по акватории Невской губы обычно менялся от 25 до 35 мкг N/л. Однако в июле, первой декаде августа и октябре он увеличивался до 100–275 мкг N/л. Средние значения коэффициентов вариации, которые характеризуют пространственную изменчивость концентраций NH_4^+ в каждый момент времени, обычно не превышали 10%. Однако в весенние и осенние месяцы, а также в периоды массового развития фитопланктона пространственная изменчивость NH_4^+ повышалась, и в эти периоды значения коэффициентов его вариации возрастали до 20–40%.

Представляется важным провести сравнение полученных результатов моделирования изменчивости концентраций NH_4^+ с данными непосредственных наблюдений. По данным наблюдений, в течение рассматриваемых четырех лет с мая по ок-

тябрь средние по акватории Невской губы концентрации NH_4^+ менялись от 46 до 204 мкг N/л. Этот диапазон значений соответствует изменчивости средних концентраций NH_4^+ , полученных по результатам моделирования. Минимальные концентрации в отдельные месяцы (май, июнь), по данным наблюдений, составляли <15 мкг N/л и достигали нулевых значений, что также соответствует модельным расчетам. Согласно наблюдениям, размах колебаний концентраций NH_4^+ меняется, как правило, от 100 до 400 мкг N/л. В июле 1986 г. он был >600 мкг N/л, а по расчетам на модели был получен диапазон значений от 100 до 275 мкг N/л. Это объясняется тем, что модель хуже воспроизводит изменчивость наблюдаемых максимальных концентраций NH_4^+ на мелководных участках в южной части Невской губы. Выяснить возможные причины этого несоответствия при ограниченном количестве наблюдений не представляется возможным.

На рис. 2 показаны наиболее характерные примеры расчетного пространственного распределения концентраций NH_4^+ в отдельные сроки по акватории Невской губы. В центральной части

губы хорошо прослеживается зона транзита вод р. Невы. В пределах нее в каждый момент времени могут наблюдаться как более низкие, так и более высокие концентрации NH_4^+ по сравнению с южной частью губы и прибрежными участками. Величины пространственных градиентов концентраций NH_4^+ и их внутрисуточная изменчивость здесь наименее выражены. Следующая зона охватывает южную часть губы (южнее Морского канала) и узкие прибрежные участки. В ней основной вклад в формирование пространственного распределения и временной изменчивости концентраций NH_4^+ вносят внутриводоемные процессы биогидрохимической его трансформации на фоне достаточно значительных внутрисуточных изменений гидрологических условий, включая условия перемешивания водных масс. Размеры этой зоны зависят от скорости и направления ветра, а также течений, структура которых определяется ветровым режимом. Наиболее значительны они при ветрах преимущественно западного направления. С помощью моделирования можно выявить для конкретных погодных условий такой проектный режим водообмена Невской губы с Финским зал., при котором распределение концентраций БВ по акватории губы будет близким к таковому при естественном водообмене. Пример такого расчета для 20.10.1987 г. приведен на рис. 2в и 2г, иллюстрирующих практически подобное распределение концентраций NH_4^+ по акватории губы соответственно при естественном и проектном режимах водообмена с Финским зал.

Средние по акватории Невской губы концентрации NO_2^- для рассматриваемых четырех лет с мая по октябрь менялись от 3.5 до 18 мкг N/л. Максимальные их концентрации достигали 25–30 мкг N/л, а минимальные – близки к нулевым значениям. Размах пространственных колебаний концентраций NO_2^- составлял в среднем 5–10, а максимальный 18–30 мкг N/л. Средние значения коэффициентов вариации, которые характеризуют пространственную изменчивость концентрации NO_2^- в каждый момент времени, менялись от 10 до 30%. Преимущественно в весенний и особенно осенний периоды их пространственная неоднородность существенно возрастает, и тогда коэффициенты вариации концентраций NO_2^- достигают 40–80%.

Средние по акватории Невской губы концентрации NO_2^- , по данным непосредственных наблюдений, за четыре года с мая по октябрь меня-

лись от 6 до 25 мкг N/л. Диапазон изменения максимальных концентраций составлял в основном 11–40 мкг N/л. Однако в июле на отдельных станциях в наиболее продуктивном южном районе Невской губы максимальные концентрации NO_2^- составляли >70 мкг N/л. Минимальные концентрации менялись от 0 до 6.5, а средний размах пространственных колебаний – от 10 до 32 мкг N/л. Таким образом, результаты моделирования распределения концентраций NO_2^- в Невской губе достаточно хорошо соответствуют имеющимся данным непосредственных наблюдений.

На рис. 3 показаны наиболее характерные примеры пространственного распределения концентраций NO_2^- по акватории Невской губы. В течение всего вегетационного периода более высокие концентрации NO_2^- характерны для южной и юго-восточной части Невской губы, а также для узкой прибрежной зоны. Его содержание и пространственная изменчивость в транзитной зоне существенно ниже.

Аналогичные характерные пространственные зоны можно выделить и по другим взаимосвязанным компонентам изучаемой экосистемы. Их формирование определяется совокупностью сопряженных процессов. Однако основное влияние оказывают пространственно-временные особенности гидрологического режима Невской губы и значения биогенной нагрузки на ее экосистему. На участках с высокими скоростями течений основной вклад в формирование пространственной структуры вносит процесс адвективного переноса БВ. В областях замедленного водообмена и разномасштабных вихревых образований первостепенная роль в формировании пространственной неоднородности полей распределения БВ принадлежит внутриводоемным процессам их биогидрохимической трансформации и турбулентной диффузии. В зонах конвергенции течений могут формироваться узкие фронтальные зоны с высокими пространственными градиентами концентраций биотических компонентов водной экосистемы. Они хорошо прослеживаются в отдельные сроки для концентраций NH_4^+ (рис. 2в) и NO_2^- (рис. 3в, 3г).

Средние по акватории Невской губы концентрации NO_3^- с мая по октябрь менялись от 170 до 405 мкг N/л. Максимальные значения составляли >410, а минимальные <100 мкг N/л. Средний раз-

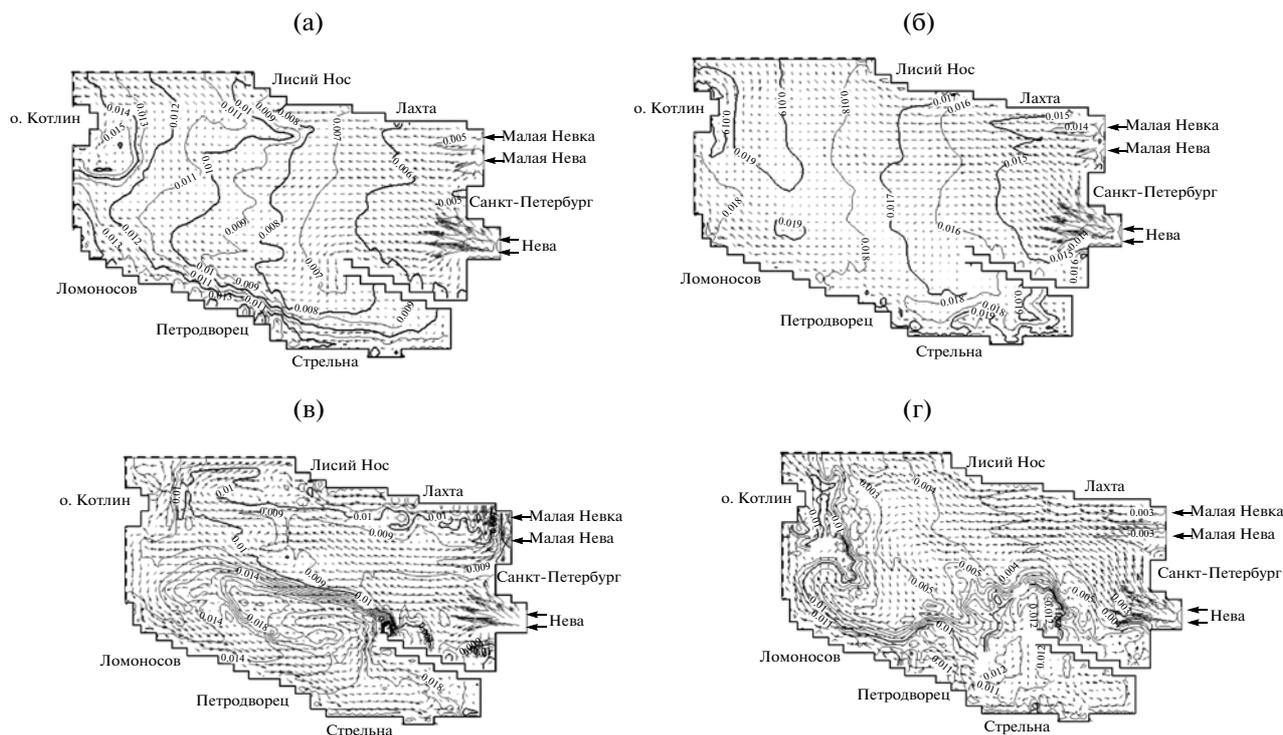


Рис. 3. Примеры пространственного распределения расчетных концентраций NO_2^- , мг N/л, в пределах акватории Невской губы: (а)–(г) – соответственно на 20.05.1984 г., 15.07.1986 г., 04.08.1986 г. и 20.10.1986 г.

мах пространственных колебаний концентраций NO_3^- менялся от 15 до 41, а максимальный – от 58 до 200 мкг N/л. В отличие от NH_4^+ и NO_2^- , временная внутригодовая динамика содержания NO_3^- для исследованного периода имеет сходную структуру. Минимальные значения наблюдаются летом, а более высокие – весной и осенью. Уменьшение содержания в воде NO_3^- в значительной степени связано с развитием фитопланктона. Поэтому летом концентрация NO_3^- в южной и юго-восточной части Невской губы может быть ниже, чем в центральной транзитной зоне. Весной и осенью, наоборот, содержание NO_3^- на более мелководных участках становится несколько выше по сравнению с зоной транзита невских вод. Средние значения коэффициентов пространственной вариации концентраций NO_3^- менялись незначительно (в пределах <5%). В периоды массового развития фитопланктона и преимущественно в осенние месяцы их пространственная изменчивость повышалась и значения коэффициентов их вариации достигали 8–13%.

По данным непосредственных наблюдений, средние по акватории Невской губы концентрации NO_3^- с мая по октябрь менялись от 195 до 740 мкг N/л. Максимальные значения на отдельных мелководных станциях в юго-восточной и южной части губы в мае, сентябре и октябре составляли >1000 мкг N/л. В летние месяцы максимальные концентрации NO_3^- менялись в диапазоне 450–850, а минимальные составляли <100 мкг N/л. Обычный диапазон изменчивости минимальных концентраций NO_3^- составлял 50–200 мкг N/л. Расчеты концентраций NO_3^- , как и NH_4^+ , показывают, что модель хуже воспроизводит диапазон изменчивости их максимальных значений, наблюдаемых на мелководных высокопродуктивных участках южной части Невской губы.

Результаты моделирования показывают, что основной фракцией минерального N ($N_{\text{мин}}$) служит NO_3^- : на него приходится 60–70%, а доля NO_2^- составляет <5% $N_{\text{мин}}$. Относительно низкое содержание в воде NO_2^- – свидетельство интенсивного развития процессов окисления органического вещества в Невской губе (и, следовательно, развития процессов самоочищения водной среды).

Средние по акватории концентрации DON в течение вегетационного сезона в рассматриваемые годы менялись от 210 до 975 мкг N/л. Более высокое его содержание характерно для продуктивных участков акватории Невской губы: южной и особенно — юго-восточной. В летние месяцы на мелководных участках концентрация DON составляла >1000 мкг N/л. Средний размах его пространственных колебаний — от 90 до 150, а максимальный — от 370 до 1550 мкг N/л.

Изменения в пространственном распределении DON по акватории Невской губы обычно невелики, и средние значения коэффициентов пространственной вариации его концентраций составляли 5–7%. Однако в периоды максимальной интенсивности развития продукционно-деструкционных процессов в экосистеме и также преимущественно в осенние месяцы его пространственная изменчивость повышалась. В эти периоды значения коэффициентов вариации его концентраций возрастали до 14–35%.

По данным непосредственных наблюдений, средние по акватории концентрации DON в течение вегетационного сезона в рассматриваемые годы менялись от 308 до 710 мкг N/л. В летние месяцы на мелководных участках в южной части Невской губы концентрации DON менялись в пределах 515–1390 мкг N/л. Наблюдавшийся размах пространственных колебаний его концентраций составлял 260–1100 мкг N/л. Таким образом, полученные результаты моделирования динамики концентраций DON в Невской губе в целом достаточно полно соответствуют имеющимся наблюдениям.

Моделирование позволило оценить пространственно-временную изменчивость содержания N в составе ND. Отметим, что роль детрита в функционировании экосистемы Невской губы чрезвычайно велика [8]. Однако с количественной точки зрения этот процесс изучен недостаточно. Как показывают расчеты, средняя концентрация ND в вегетационный период менялась от 200 до 525 мкг N/л. Более высокие концентрации ND характерны для южной, юго-восточной частей и некоторых прибрежных участков Невской губы. Здесь достигаются максимальные концентрации ND (≥ 600 –700 мкг N/л). Средний размах пространственных колебаний концентраций ND составлял 50–350, а максимальный — 220–650 мкг N/л. В летние месяцы пространственная изменчивость содержания ND в воде, как правило, невелика и коэффициенты пространственной вариации его концентраций меняются в пределах 5–20%. Наибольшая пространственная их изменчивость

характерна для весны и осени. В эти периоды коэффициенты вариации его концентраций вырастают до 30–40%.

Зная содержание в воде отдельных фракций минерального и органического N, можно оценить временную изменчивость общего азота ($N_{\text{tot}} = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{DON} + \text{ND}$) в воде акватории Невской губы. Как показывают расчеты, в течение вегетационного периода минимальные, средние и максимальные концентрации в воде N_{tot} менялись соответственно в пределах 707–980, 790–1506 и 1260–3807 мкг N/л. Размах колебаний концентраций N_{tot} в 1985–1987 гг. составил 53–850 мкг N/л, а в 1984 г. он был наибольшим (109–2828 мкг N/л). Пространственная изменчивость полей распределения N_{tot} по акватории Невской губы, как правило, невелика (не более 5–7%), однако с последней декады июля по первую декаду августа они увеличивались до 18–30%.

Данные непосредственных наблюдений показывают, что в период вегетации минимальные, средние и максимальные концентрации N_{tot} в воде были в пределах соответственно 410–900, 760–1309 и 1090–6480 мкг N/л. Наибольшие измеренные значения концентраций N_{tot} в воде были зафиксированы в 1984 г. на мелководных участках южной части Невской губы в мае и октябре (соответственно 3600 и 6480 мкг N/л). В последующие три года наблюдений максимальные концентрации N_{tot} не превышали 2860 мкг N/л. Таким образом, пределы колебаний минимальных, средних и максимальных концентраций N_{tot} в Невской губе воспроизводятся моделью в целом корректно.

Пространственно-временная изменчивость концентраций соединений P

Содержание в воде DIP имеет важнейшее значение для развития фитопланктона. Изучение его внутри- и межгодовой динамики необходимо для оценки продукционного потенциала Невской губы, а также для определения трофического статуса водоема и тенденций его возможных изменений. Данные расчетов свидетельствуют о том, что внутри- и межгодовые изменения концентраций DIP в Невской губе весьма разнообразны, а выявить и обозначить определенные их закономерности достаточно сложно.

Средние концентрации DIP в вегетационный период за рассматриваемые годы менялись от 0.05 до 19.9 мкг P/л. Расчетное распределение DIP в пределах акватории Невской губы для 1986 г. на моменты проведения мониторинговых наблюде-

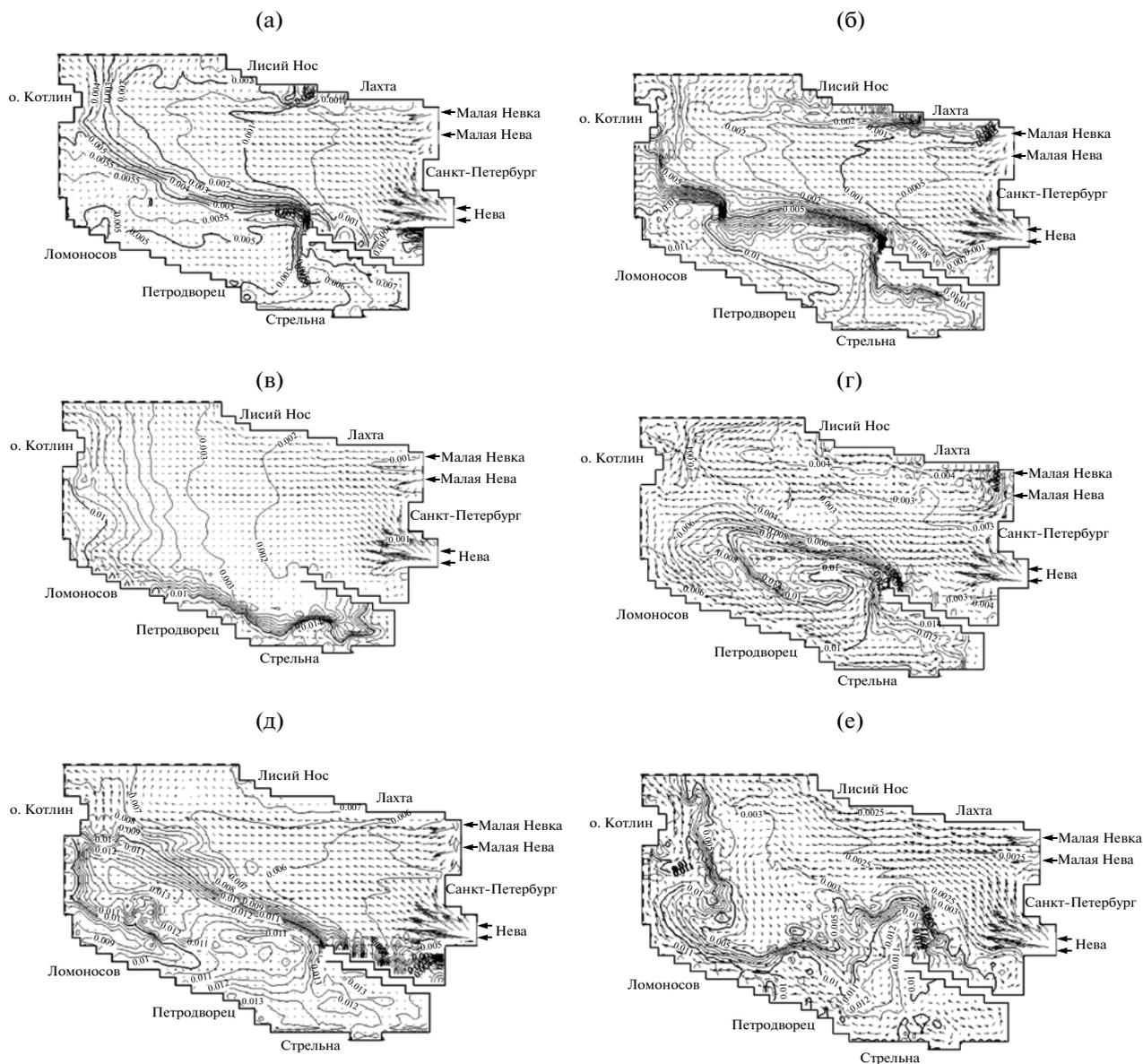


Рис. 4. Примеры пространственного распределения расчетных концентраций DIP, мг P/л, в пределах акватории Невской губы: (а)–(е) – соответственно на 21.05.1986 г., 10.06.1986 г., 15.07.1986 г., 04.08.1986 г., 18.09.1986 г. и 20.10.1986 г.

ний (рис. 4) отражает наиболее характерные структуры пространственных неоднородностей, которые были отмечены и в другие исследуемые годы. Более высокое содержание DIP характерно для продуктивных участков Невской губы: южной и особенно – юго-восточной. Именно здесь достигаются максимальные концентрации DIP (23.5–46.1 мкг P/л). В 1984 г. максимальные концентрации DIP составили >100 мкг P/л. Минимальные концентрации DIP в периоды интенсивного развития фитопланктона (июль – первая декада августа) могут снижаться практически до нулевых значений. Средний пространственный размах ко-

лебаний концентраций DIP составлял 4.9–12.4, а максимальный – 15.9–115 мкг P/л.

Пространственная изменчивость распределения концентрации DIP достаточно высока, средние коэффициенты вариации его концентраций составляли 21–60, а максимальные – 80–115%. Высокая пространственная неоднородность в распределении концентрации DIP по акватории Невской губы связана, в частности, с периодами интенсивного развития фитопланктона. Однако имеются исследования [8], которые свидетельствуют о том, что планктонные водоросли, которые поступают в Невскую губу с невскими вода-

ми, быстро насыщаются по Р. После этого развитие фитопланктона уже больше не зависит от концентрации содержащегося в воде DIP. В таком случае пространственная неоднородность в распределении DIP зависит от изменения гидрологических условий и структуры течений, формирующейся под их влиянием. Исследования внутригодовой динамики коэффициента пространственной вариации концентраций DIP показывают, что могут быть и другие причины изменчивости их распределения, механизмы которых в явном виде пока не учтены в данной модели (например, процессы обмена на границе раздела вода — деятельный слой донных отложений).

Данные непосредственных наблюдений показывают, что в Невской губе средние концентрации DIP с мая по октябрь за рассматриваемые годы менялись от 3.3 до 23.6 мкг Р/л. В данном случае результаты расчетов дают хорошее совпадение с наблюдениями. Расчетные минимальные концентрации DIP меняются от 0 до 7.8, а максимальные — от 13 до 170 мкг Р/л, наибольшие концентрации DIP зафиксированы в июле 1985 г. (как правило, <100 мкг Р/л). Размах наблюдаемых пространственных колебаний менялся от 12.7 до 169.3 мкг Р/л, однако наиболее часто верхняя граница пространственных колебаний для DIP была <100 мкг Р/л.

Наблюдаемые пределы изменчивости размаха пространственных колебаний концентраций DIP соответствуют приведенным выше его расчетным значениям. Сравнение наблюдений и результатов моделирования показывает, что модель в целом корректно воспроизводит изменчивость концентраций DIP в Невской губе, а также меняющееся положение фронтальных зон концентраций DIP по акватории губы в отдельные сроки наблюдений (рис. 4).

Еще одним важнейшим показателем функционирования экосистемы служит концентрация DOP. Данные моделирования динамики DOP, как и DIP, свидетельствуют о высокой изменчивости внутригодового содержания DOP в воде Невской губы. Средние концентрации DOP в период вегетации за рассматриваемые годы менялись от 1.2 до 27.1, а максимальные — от 11.1 до 183.5 мкг Р/л. Максимальные концентрации DOP фиксировались в июле—августе 1984 г. В остальные годы, как показывают расчеты, максимальные их значения не превышали 30 мкг Р/л. Более высокие концентрации DOP наблюдались в южной и юго-восточной части Невской губы.

Качественно картины пространственного распределения концентраций DOP и DIP практически полностью соответствуют друг другу. Сред-

ний размах пространственных колебаний концентраций DOP на протяжении вегетационного сезона составлял 2.5—20.7, а максимальный 27.7—181.3 мкг Р/л.

Пространственная неоднородность распределения концентраций DOP по акватории Невской губы была ниже, чем DIP. Так, средние величины коэффициента пространственной вариации концентраций DOP менялись от 12 до 36, а максимальные — обычно от 26 до 39%. Только в августе — начале сентября 1984 г. значения этого коэффициента были >100%.

По данным непосредственных наблюдений, за рассматриваемые годы с мая по октябрь средние концентрации DOP менялись от 2.8 до 9.8, минимальные — от 0 до 4.7, а максимальные — от 6.7 до 48.5 мкг Р/л. Размах пространственных колебаний концентраций DOP на протяжении вегетационного сезона менялся в пределах 6.3—45 мкг Р/л. Таким образом, за исключением 1984 г., оцененные по данным наблюдений и расчетов пределы пространственно-временной изменчивости концентраций DOP в Невской губе для других лет вполне сопоставимы.

Как показывают расчеты, средняя концентрация PD в вегетационный период обычно была в пределах 20.3—29.1 мкг Р/л. Только в 1984 г., когда отмечены исключения и по другим компонентам, средние по акватории Невской губы концентрации PD составляли 26.8—130 мкг Р/л, а максимальная (1624.8 мкг Р/л) была зафиксирована в августе. Более высокие концентрации PD характерны для южной и юго-восточной частей некоторых прибрежных участков Невской губы: максимальные концентрации PD здесь >50—75 мкг Р/л. Средний размах пространственных колебаний концентраций PD за рассматриваемые годы составил 7.5—106, а максимальный 37—1644 мкг Р/л.

В летние месяцы пространственная изменчивость концентраций PD в воде в целом по акватории Невской губы невелика (в пределах 7—30%). Наибольшая пространственная изменчивость концентраций PD характерна в основном для весны и осени, и коэффициенты вариации его содержания в эти сезоны возрастают до 20—41%. Таким образом, характер пространственного распределения, а также степень изменчивости концентраций PD по акватории Невской губы соответствуют основным особенностям внутри- и межгодовой динамики, выявленной для N-содержащей фракции детрита (ND).

Зная содержание в воде отдельных фракций минерального и органического Р, можно оценить временную изменчивость общего Р ($P_{\text{tot}} = \text{DIP} +$

+ DOP + PD) в воде Невской губы. В вегетационный период минимальные, средние и максимальные концентрации P_{tot} менялись соответственно в пределах 4.6–25.4, 28.2–125.1 и 62.3–919.5 мкг Р/л. Размах колебаний концентраций P_{tot} в 1985–1987 гг. составлял 8.1–61 мкг Р/л, в 1984 г. он был наибольшим (8.7–914.8 мкг Р/л). Пространственная изменчивость концентраций P_{tot} относительно невелика – обычно не выше 2–30%. Однако во второй половине июля – первой декаде августа она может значительно возрасти и быть даже >100%.

Данные непосредственных наблюдений показывают, что в воде Невской губы с мая по октябрь за рассматриваемые годы минимальные, средние и максимальные концентрации P_{tot} изменялись соответственно в пределах 0.6–15, 8.8–28.7 и 19–170 мкг Р/л. Размах пространственных колебаний менялся от 16.7 до 166 мкг Р/л. Таким образом, за исключением 1984 г., данные наблюдений и расчетов для рассматриваемых лет дают сопоставимые пределы пространственно-временной изменчивости концентраций P_{tot} в водах Невской губы.

Межгодовая изменчивость концентраций соединений N и P

С помощью модели исследовались также основные особенности межгодовой изменчивости концентраций соединений N и P (рис. 5). В межгодовой изменчивости концентраций NH_4^+ , NO_2^- и DIP трудно выявить какие-либо устойчивые тенденции и закономерности. Значения концентраций БВ для одного и того же периода в разные годы могут отличаться друг от друга в 2–5 раз. Для DIP и NO_2^- существенные межгодовые различия имеют место не только для средних их концентраций, но также и для их дисперсий. Напротив, временная внутригодовая динамика содержания NO_3^- для всех исследованных лет в целом имеет сходную структуру. Минимальные значения концентраций NO_3^- наблюдаются, как правило, летом, а более высокие – весной и осенью. Межгодовые различия в концентрациях NO_3^- для одних и тех же периодов имеются, однако они не столь ярко выражены, как для NH_4^+ и NO_2^- . Значения концентраций для одного и того же периода в разные годы могут отличаться друг от друга не более чем в 1.5 раза. Межгодовые различия дисперсий концентраций NO_3^- выражены незначительно (рис. 5).

Сходный характер внутригодовой динамики для всех рассматриваемых лет обнаруживается

также для концентраций DON и DOP. Максимальные их концентрации наблюдаются, как правило, в летние месяцы, приурочены они к периодам наиболее активного развития продукционных процессов в воде Невской губы. Низкие концентрации DON и DOP характерны для мая и осенних месяцев. Значения концентраций DON и DOP для одного и того же периода в разные годы могут отличаться в 2–3 раза, наиболее сильные различия в межгодовых концентрациях наблюдаются летом и осенью. Межгодовые различия дисперсий концентраций DON выражены незначительно, в отличие от таковых для DOP (рис. 5).

Кроме 1984 г., внутри- и межгодовая изменчивость концентраций ND и PD для всех рассматриваемых лет имеет сходный характер. Пониженные концентрации ND и PD наблюдаются летом, а повышенные – весной и осенью. Средние концентрации как ND, так и PD для одних и тех же периодов в разные годы различаются не более чем в 1.5 раза. Межгодовые различия дисперсий концентраций ND и PD в летние месяцы также невелики. Эти различия становятся более значительными весной и осенью.

Таким образом, в период вегетации (с мая по октябрь) средние концентрации ND и PD были практически одного порядка во все рассмотренные годы (исключение – август 1984 г.) (рис. 5).

Пространственно-временная изменчивость концентраций растворенного в воде O_2

С помощью модели исследована также внутри- и межгодовая динамика концентраций растворенного в воде O_2 , а также его процентного насыщения (O_2^*). Изменение содержания O_2 в воде зависит от ряда внешних факторов (речной сток, T_w , процессы газообмена между водной средой и атмосферой), а также от внутриводоемных биогидрохимических процессов.

Структуры внутригодовой динамики концентрации растворенного в воде O_2 в Невской губе в течение вегетационного периода для всех рассмотренных лет были схожи. Наименьшие концентрации в воде O_2 приходятся на летние месяцы, а наибольшие – на весенние и осенние. За рассматриваемые годы минимальные концентрации O_2 изменялись в пределах 5.22–5.80, средние – 5.50–9.33, максимальные – 8.38–9.60 мг O_2 /л. Размах пространственных колебаний концентраций растворенного O_2 составлял в разные периоды 0.09–2.06 мг O_2 /л. Пространственная измен-

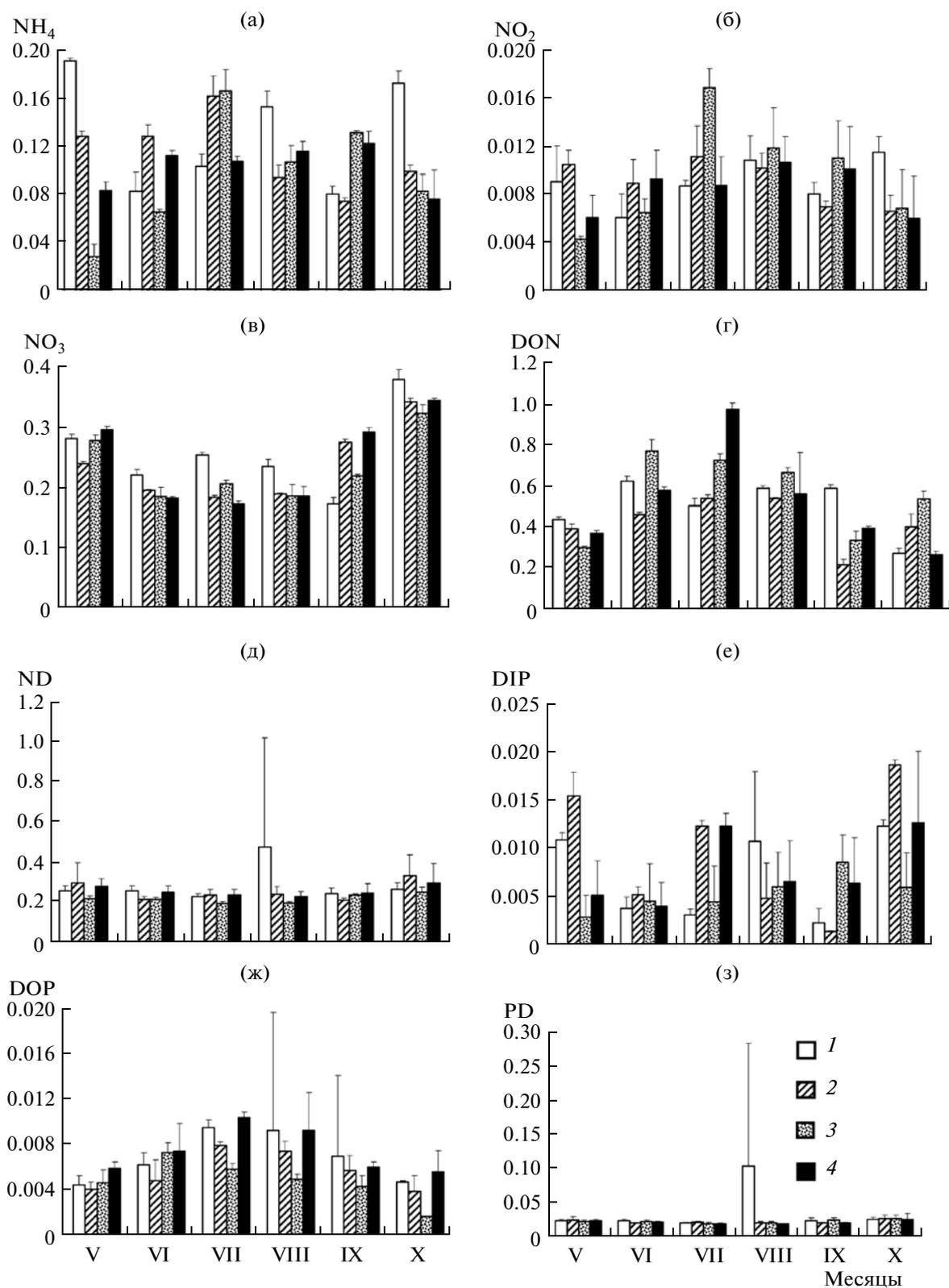


Рис. 5. Временная изменчивость распределения по акватории Невской губы концентраций БВ, рассчитанных на модели и измеренных в сроки проведения гидрохимических съемок: (а)–(д) – соответственно NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , DON, ND, мг N/л; (е)–(з) – соответственно DIP, DOP, PD, мг P/л. Величины погрешностей представлены в виде стандартных отклонений. 1 – 1984; 2 – 1985; 3 – 1986; 4 – 1987 гг.

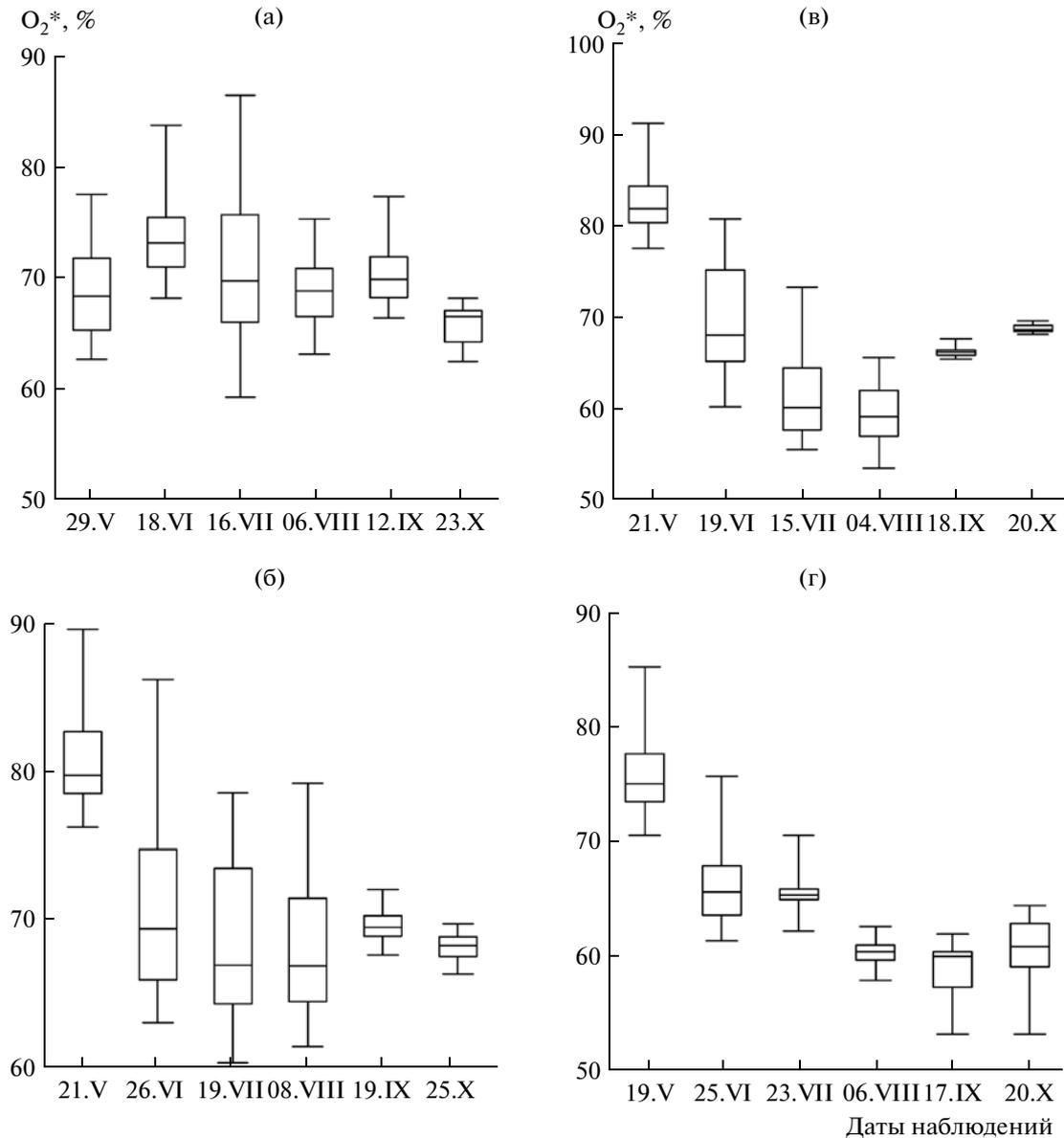


Рис. 6. Изменения во времени концентраций O_2^* в водах Невской губы: (а)–(г) – соответственно за 1984–1987 гг.

чивость содержания в воде O_2 невелика (в пределах 1–6%).

По данным непосредственных наблюдений, с мая по октябрь минимальные концентрации O_2 изменялись в пределах 5.16–8.27, средние – 5.89–8.79, максимальные – 6.59–9.99 мг O_2 /л. Размах пространственных колебаний концентраций растворенного O_2 составлял 0.98–4.25 мг O_2 /л. Значения коэффициентов пространственной вариации концентраций O_2 изменялись в пределах 2.6–11.7%. Таким образом, расчетные пределы кон-

центраций растворенного O_2 вполне соответствуют имеющимся данным наблюдений.

Результаты расчетов относительных концентраций O_2^* на моменты проведения мониторинговых наблюдений представлены на рис. 6. Наименьшие их значения наблюдались летом и осенью (53.1–60.2%), а наибольшие (>80%) характерны для весеннего периода. Средние значения O_2^* были в пределах 59.1–82.3%. Размах пространственных колебаний концентраций O_2^* в воде Невской губы составлял 1.5–27.2%. Изменчивость коэффици-

ента пространственной вариации концентрации O_2^* невелика — в пределах 1–8%.

Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности модели по каждой переменной состояния водной среды на момент проведения гидрологических, гидрохимических и гидробиологических съемок проводился расчет T -критерия [21]. Этот критерий был изначально предложен для характеристики экономических моделей. Впервые его применение для оценки адекватности экологических моделей было показано на примере модели фосфорной системы, использованной для изучения условий евтрофирования вод оз. Балатон (Венгрия) [7]. T -критерий дает возможность охарактеризовать в отдельности (для каждого года и месяца) соответствия наблюдаемых значений показателей и их расчетных аналогов. Чем выше оцениваемое при сравнении наблюдаемых и расчетных концентраций БВ значение T -критерия, тем выше их расхождения, и наоборот. Оценка значений T -критерия для разных БВ (для каждого года и каждого месяца) позволяет установить пределы меж- и внутригодовой его изменчивости для всесторонней оценки адекватности разработанной модели. В данном случае для каждого года значения T -критерия оценивались также в виде средних по всем БВ за продуктивный сезон (май–октябрь).

Значения T -критерия показывают, что наибольшие расхождения между расчетными и наблюдаемыми концентрациями NH_4^+ имели место в сентябре (для 1984, 1985, 1987 гг. его значения составляли 0.4471–0.4712) и в мае 1986 г. (0.6963). Наилучшие результаты расчетов концентраций NH_4^+ отмечены в июле, когда в воде Невской губы обычно наблюдается летний пик массового развития фитопланктона. В 1984–1987 гг. отмечены наименьшие значения T -критерия (0.1944–0.2219), а его средние за сезон значения менялись в пределах 0.3187–0.3483.

Моделирование показало, что наибольшие значения T -критерия для NO_3^- имели место в рассматриваемые годы, как правило, в августе, а в 1984 г. — в октябре. В 1984–1987 гг. они менялись в пределах 0.2869–0.3703. В остальные месяцы адекватность модели, оцениваемая по этой переменной, была существенно выше. Наименьшие значения T -критерия получены в разные месяцы, и в 1984–1987 гг. их значения менялись в пределах 0.1163–0.1537, а средние за сезон значения — 0.2185–0.2560.

Для концентраций DON и DOP наибольшие и наименьшие расхождения между расчетами и наблюдениями имели место в разные периоды. Трудно выявить и четко обозначить какие-либо определенные тенденции и во временном изменении T -критерия в разные годы. Наибольшие его значения для DON в 1984–1987 гг. менялись в пределах 0.2355–0.4384, а для DOP — 0.3687–0.6197. Наименьшие значения T -критерия для DON в эти годы составляли 0.1187–0.1519, а для DOP — 0.1467–0.2329. Средние за сезон значения T -критерия свидетельствуют о том, что в 1984–1987 гг. адекватность модели по DON выше, чем для DOP: для DON они составляли 0.1711–0.2470, а для DOP — 0.2528–0.3326.

Проверка адекватности модели по такому показателю, как глубина видимости белого диска (ZwD), позволила не только сравнить результаты моделирования с данными непосредственных наблюдений, но также и проверить работоспособность Гидрооптического блока модели и используемых в нем эмпирических зависимостей. Наибольшие расхождения между расчетными и наблюдаемыми значениями ZwD в 1984–1987 гг. имели место в октябре (величины T -критерия менялись в пределах 0.3038–0.3739). В остальные месяцы расхождения между указанными значениями ZwD ниже, наименьшие значения T -критерия в 1984–1987 гг. были в пределах 0.1794–0.2340, а средние за сезон — 0.2518–0.2784.

Значения T -критерия показали, что модель достаточно хорошо воспроизводит внутригодовую динамику не только ZwD, но также и оптических характеристик водной среды и концентраций сестона в воде Невской губы.

Результаты расчетов содержания растворенного в воде O_2 позволяют говорить о высокой адекватности модели. В 1984–1987 гг. в летние месяцы значения T -критерия по сравниваемым расчетным и наблюдаемым концентрациям O_2 изменялись в пределах 0.0492–0.0654, для весенних и осенних месяцев — 0.0127–0.0218, а для средних за сезон концентраций O_2 — 0.0321–0.0440.

Наибольшие расхождения между расчетами и наблюдениями выявлены для DIP и NO_2^- , содержание которых, как правило, ниже, чем других БВ. Особенно это характерно для ряда мелководных участков Невской губы. При резком увеличении численности фитопланктона на отдельных прибрежных станциях их концентрации часто близки к аналитическому нулю. Однако модель не всегда способна детально воспроизвести такие, как правило, локальные особенности про-

Таблица 2. Пределы пространственной изменчивости средних концентраций некоторых химических показателей качества воды Невской губы по данным расчетов на модели и непосредственных наблюдений в разные годы

Гидрохимический показатель, размерность	Расчет на модели 1984–1987 гг.	Наблюдения	
		1988–1992 гг.	1993–1996 гг.
NH_4^+ , мкг N/л	10–200	55.1–241.5	32–157
NO_2^- , »	3.5–18	2.9–50.9	2.5–11.2
NO_3^- , »	170–405	171.5–1216.1	61–396
N_{tot} , »	790–1506	663.3–1785.1	542–1095
DIP, мкг P/л	0.05–19.9	2.9–24.9	5.0–28.0
DOP, »	1.2–27.1	3.7–8.9	5.0–23.0
O_2^* , %	53.1–91.1	82.02–102.33	55.8–167.3

пространственной динамики БВ. В результате этого значительно возрастает величина T -критерия для данных компонентов модели.

Наибольшие расхождения между расчетами и наблюдениями DIP были выявлены в сентябре (1984, 1985 гг.) и в мае (1986, 1987 гг.): значения T -критерия в эти месяцы составляли 0.5473–0.8753. Наилучшее совпадение расчетных и наблюдаемых концентраций DIP отмечено в июле (1984, 1986 гг.) и октябре (1985, 1987 гг.): значения T -критерия в указанные месяцы менялись в пределах 0.2466–0.4220, а средние за сезон – 0.4351–0.5455. Выяснить причины расхождений не представляется возможным. Однако в первую очередь необходимо обратить внимание на имеющиеся неточности гидрохимических определений.

Наиболее значительные расхождения между расчетами и наблюдениями NO_2^- были в летние месяцы (июнь 1985 г., июль 1984 и 1987 гг.) и в мае (1986 г.): значения T -критерия для этих месяцев составляло 0.5207–0.5935. Наименьшие значения T -критерия отмечались в мае 1984 и 1987 гг. – соответственно 0.2058 и 0.2305, июле 1985 г. – 0.2346 и октябре 1986 г. – 0.2812. Средние за сезон значения T -критерия для NO_2^- составляли 0.3492–0.3866.

Результаты моделирования показывают, что в 1984–1987 гг. осредненные по всем биотическим компонентам значения T -критерия, рассчитываемые для каждой съемки, менялись от 0.2306 до 0.3778, а средние его значения составляли 0.2812.

Таким образом, на данном этапе разработки имитационной модели можно говорить о вполне приемлемом качественном и количественном соответствии расчетных и наблюдаемых значений показателей. Дальнейшее совершенствование модели будет продолжено. При разработке модели имеет значение количество и качество исходных данных, а на получение новых данных в ближайшее время рассчитывать вряд ли возможно.

Сравнение данных моделирования и непосредственных наблюдений за 1988–1996 гг.

Расчеты на модели и проверка ее адекватности проводились по наблюдениям 1984–1987 гг., и естественно возникает вопрос: насколько полученные результаты могут быть репрезентативными для анализа современного состояния экосистемы Невской губы? Анализ данных [13, 19] и сравнение их с полученными расчетными значениями концентраций БВ (табл. 2) показывает, что в 1988–1996 гг. по этим гидрохимическим показателям существенных изменений не произошло. Следовательно, модель может быть использована для исследования также и современного состояния экосистемы Невской губы без существенной корректировки ее структуры и значений модельных параметров.

Оценка продукционного потенциала водной экосистемы Невской губы

Расчеты на модели показывают, что во взвешенном органическом веществе на долю N и P в составе детрита приходится 45–75%. На N и P в составе фитопланктона в среднем приходится от 10 до 30%, а в составе гетеротрофного бактериопланктона – от 10 до 20%. Роль зоопланктона в экосистеме Невской губы невелика.

Отношение $N_{\text{мин}}/\text{DIP}$ менялось от 30 до 190, органического N к органическому P ($N_{\text{орг}}/P_{\text{орг}}$) было в пределах 16–40, а общего N к общему P ($N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$) – 23–49. Внутригодовая динамика указанных БВ от года к году качественно менялась. Эти результаты хорошо согласуются с данными многолетних наблюдений [13, 16–18]. На основе расчетов и по данным наблюдений показано, что содержание N и P в воде Невской губы, очевидно, не может быть лимитирующим фактором, сдерживающим увеличение биопродуктивности аква-

Таблица 3. Средние за период с мая по октябрь значения времени оборота, сут, химических и биологических компонентов модели экосистемы Невской губы для 1984–1987 гг.

Компоненты модели	1984	1985	1986	1987
B_N	0.99	0.81	0.76	0.65
B_P	1.14	0.75	0.86	0.65
F_N	2.82	4.17	3.80	3.76
F_P	2.71	3.13	3.79	2.93
PR_N	1.62	1.61	0.81	1.11
PR_P	1.60	1.59	0.82	1.08
Z_N	1.74	2.21	2.11	2.65
Z_P	1.64	2.18	2.10	3.12
DON	3.43	3.60	3.71	3.17
NH_4^+	3.33	3.73	3.51	3.27
NO_2^-	1.99	1.93	1.79	1.85
NO_3^-	3.60	3.93	4.01	3.48
ND	3.04	3.11	2.98	2.71
DOP	2.08	2.21	1.60	1.72
DIP	3.55	3.70	3.91	3.35
PD	2.71	3.10	3.00	2.51

тории. На это указывает несоответствие между сравнительно низкими показателями развития фитопланктона и достаточно высокими концентрациями БВ.

Оценки значений времени оборота химических и биологических компонентов морской среды (табл. 3) показывают, что среднее время оборота N и P в составе биомассы фитопланктона обычно >3 сут и сопряжено со временем оборота БВ (DIP, NO_3^- и NH_4^+). Однако вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества невелик. Наиболее вероятная причина этого – низкая прозрачность воды в Невской губе (в среднем 0.6–1.1 м).

Результаты моделирования и данные наблюдений [1, 3, 4, 8] показывают, что основная причина интенсивного развития гетеротрофных микроорганизмов в Невской губе – поступление значительных количеств аллохтонного органического вещества из внешних источников.

Влияние КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений на динамику распределения БВ в морской среде и возможное формирование дополнительных локальных областей с повышенными значениями ее биопродуктивности в целом невелико.

Оно, помимо других причин, во многом зависит от скорости и направления ветра, времени существования той или иной ветровой ситуации, складывающихся под влиянием указанных факторов структуры течений и пространственного масштаба вихревых образований. Как показали расчеты на модели и последующий статистический анализ полей распределения компонентов морской среды для естественных и проектных условий, влияние КЗС на распределение БВ прослеживается только на нескольких шагах расчетной пространственной сетки (в среднем до 5–10 шагов по ней, или на 2.5–5 км) в зависимости от ветровых условий. При этом могут достоверно различаться либо средние значения концентраций БВ, либо их дисперсии, либо и средние и дисперсии.

ВЫВОДЫ

Применение пространственно-неоднородной имитационной модели для исследования процессов трансформации форм N и P, а также динамики растворенного в воде O_2 позволило провести детальный анализ распределения концентраций БВ по акватории Невской губы и выявить основные качественные и количественные особенности формирования их пространственно-временной изменчивости. Впервые такое исследование проведено системно для всего вегетационного периода и для нескольких лет, по которым имеются подробные наблюдения. Достоинство модели – в ее структуре, которая формировалась так, чтобы можно было использовать данные стандартных многолетних гидрологических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений, регулярно проводимых СЗУГКС по акватории Невской губы. Расчеты по Гидродинамическому и Гидротермическому блокам модели также проводятся на основе данных многолетних стандартных срочных метеорологических наблюдений Санкт-Петербургской ГМО.

Результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высоком качественном и количественном соответствии расчетного распределения концентраций БВ и O_2 имеющимся их наблюдениям. Это позволяет говорить о возможности дальнейшего усовершенствования структуры модели и практическом ее использовании различными организациями в качестве действенного инструмента водно-экологических исследований, а также при оценке современного состояния экосистемы Невской губы и влияния на нее антропогенных факторов. Важнейшей задачей остается изучение механизмов функционирования экосистемы при разных режимах работы про-

пускных ворот КЗС и формирования внешней биогенной нагрузки на экосистему губы.

Расчеты на модели показали, что экосистема Невской губы Финского зал. — чрезвычайно изменчивая во времени и в пространстве динамическая система. Для многих важных показателей качества воды (например, концентраций NH_4^+ , NO_2^- , DIP) сложно выявить устойчивую временную динамику и установить определенные, статистически достоверные закономерности. Результаты моделирования и данные наблюдений показали, что значения средних концентраций БВ для одного и того же периода в разные годы могут различаться в несколько раз. Также могут быть значительными и межгодовые различия дисперсий их концентраций. Формирование неоднородного распределения концентраций компонентов экосистемы Невской губы происходит под влиянием совместного действия ряда биотических и абиотических факторов, значимость которых существенно изменяется по пространству и во времени. Это лишний раз свидетельствует о том, что нужно осторожно подходить к оценкам экологического состояния данного водного объекта, которые зачастую выполняются по отдельным эпизодическим разрозненным наблюдениям без соблюдения принципов системного анализа.

Содержание соединений N и P в воде Невской губы не может ограничивать увеличение биопродуктивности этой акватории. Однако вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества невелик, что, скорее всего, связано с низкой прозрачностью воды в Невской губе. Результаты моделирования и данные наблюдений показывают, что основная причина интенсивного развития гетеротрофных микроорганизмов в водах Невской губы — значительное поступление аллохтонного органического вещества из внешних источников.

Данные моделирования позволили дать предварительную оценку возможного влияния строящегося КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений на пространственно-временную динамику полей химических и биологических компонентов экосистемы Невской губы. Показано, что при открытии всех водо- и судопропускных проходов влияние КЗС в целом невелико. Оно во многом зависит от текущих гидрометеорологических условий и гидрологической ситуации в губе, и если проявляется, то на расстоянии не более 2.5–5 км от КЗС. При этом в таких зонах, примыкающих к КЗС, концентрации БВ могут достоверно отличаться по своим статистическим характеристикам от аналогичных значений концентраций БВ в

естественных условиях. Будущие исследования и численные эксперименты на модели позволят ответить на вопросы о том, какие перестройки будут происходить в экосистеме Невской губы не только в связи с изменениями гидрологического режима и биогенной нагрузки, но также и при различных режимах работы водо- и судопропускных проходов КЗС.

В данной работе основное внимание было уделено проверке адекватности модели, ее способности воспроизводить главные качественные и количественные закономерности пространственно-временной динамики БВ в экосистеме Невской губы. Это первый этап исследований. Вторым, наиболее важным этапом — обобщение данных о функционировании экосистемы Невской губы — связывается с исследованием балансов БВ. Поскольку все основные формы N и P в модели отслеживаются, то оценки их потоков для любого участка и всей акватории должны выявить характерные особенности формирования запасов форм N и P за счет внутренних (естественный круговорот) или внешних (антропогенная нагрузка) источников. Третий этап исследования предполагает проведение численных экспериментов на модели, чтобы можно было изучить возможные структурно-функциональные изменения в экосистеме Невской губы при различных сценариях внешних воздействий, изменяющих прежде всего гидрологический режим и биогенную нагрузку на акваторию. С помощью моделирования можно получить для разных сезонов наиболее типичные картины распределения компонентов при стандартных и аномальных режимах функционирования экосистемы.

На основании полученных результатов моделирования выявлены основные направления усовершенствования модели, чрезвычайно важные для всестороннего понимания механизмов функционирования экосистемы Невской губы. Прежде всего необходимо включить в модель описание зимнего сезона, дополнительно циклов C и Si, подразделить фитопланктон по крайней мере на две функционально-видовые группы для более аккуратного воспроизведения его развития весной и летом. Так как бентос служит важным звеном функционирования экосистемы Невской губы и процессов самоочищения водной среды, то вполне оправдано предполагаемое его включение в модель. Необходимо также уделить внимание описанию процессов обмена БВ на границе раздела вода — деятельный слой донных отложений. Учет этих процессов важен для мелководных участков Невской губы, наиболее подверженных длительному антропогенному воздействию. Донные отложе-

ния на этих участках служат вторичными источниками БВ для водной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алимов А.Ф., Никулина В.Н., Панов В.Е. и др.* Гидробиологическая характеристика Невской губы Финского залива // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29. № 3. С. 3–14.
2. Гидрология устьевой области Невы / Под ред. Байдина С.С. М.: Гидрометеиздат, 1965. 384 с.
3. *Драбкова В.Г., Беляков В.П., Каурова З.Г.* Особенности процессов антропогенного эвтрофирования в эстуарии р. Невы (восточная часть Финского залива) // Биология внутренних вод. 1999. № 1–3. С. 58–69.
4. *Драбкова 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.
5. Исследования водной системы Ладожское озеро–река Нева–Невская губа и Восточная часть Финского залива // Тр. ГГИ. 1988. Вып. 321. 152 с.
6. *Клеванный К.А.* Наводнения в Санкт-Петербурге при незавершенном комплексе защитных сооружений // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 2. С. 80–88.
7. *Леонов А.В.* Математическое моделирование трансформации соединений фосфора в пресноводных экосистемах (на примере озера Балатон). М.: Наука, 1986. 152 с.
8. Невская губа: гидробиологические исследования / Под ред. Винберга Г.Г., Гутельмахера Б.Л. Л.: Наука, 1987. 216 с.
9. *Нежиховский Р.А.* Вопросы формирования качества воды реки Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеиздат, 1985, 147 с.
10. *Подгорный К.А.* Расчет параметров термогидродинамического взаимодействия, характеристик теплового баланса и температуры воды в нестратифицированных водоемах. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. 100 с.
11. *Подгорный К.А.* Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. 328 с.
12. *Подгорный К.А.* Моделирование пространственно-временной динамики полей температуры воды в Невской губе Финского залива // Тр. VII конф. “Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей”. М.: РУДН, 2009. С. 207–215.
13. *Румянцева Э.А., Скакальский Б.Г.* Оценка временной и пространственной неоднородности вод Невской губы и восточной части Финского залива по гидрохимическим показателям // Метеорология и гидрология. 2008. № 1. С. 98–106.
14. *Руховец Л.А.* Математическое моделирование водообмена и распространения примесей в Невской губе // Метеорология и гидрология. 1982. № 7. С. 78–87.
15. *Рябченко В.А., Румянцев В.А., Коноплев В.Н. и др.* Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. РГО. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 48–57.
16. *Скакальский Б.Г., Румянцева Э.А.* Гидрохимическое районирование Невской губы // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 110–113.
17. *Смирнова Н.Ф.* Особенности структуры вод Невской губы в период 1979–1983 гг. // Вопросы охраны и рационального использования вод суши. Л.: Изд-во ЛПИ, 1985. Вып. 89. С. 51–57.
18. *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. Л.: Изд-во ЛГМИ, 1990. Вып. 107. С. 136–149.
19. Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. Румянцева В.А., Драбковой В.Г. СПб.: СПбНЦ РАН, 1999. 368 с.
20. *Podgornyj K.A.* Mathematical modeling of spatial-temporal dynamics of current fields in the Neva Bay, the Gulf of Finland // Proc. the 2nd Intern. Conf. (school) on Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas. Baltiysk. / Ed. Chubarenko B. Kaliningrad: Terra Baltica, 2010. P. 225–231.
21. *Theil H.* Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. 474 p.