

ОПЫТ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОГО АТЛАСА И ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ БИОТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЛИВЕ ЛАПЕРУЗА

В. М. Пищальник¹, А. В. Леонов²

¹ Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск); ² Институт океанологии Российской Академии наук (Москва)

Для успешного изучения состояния морских акваторий с помощью методологии математического моделирования необходимо иметь апробированную модель, адекватно воспроизводящую химические, биологические и физические процессы в водной среде, а также располагать информацией, надежно описывающей изменения состояния водной среды во времени и пространстве. В данной работе для моделирования процессов биотрансформации органических веществ в водной среде пролива Лаперуза впервые была предпринята попытка объединения двух электронных инструментов исследований — апробированной имитационной модели (Леонов, Сапожников, 1997) и электронного атласа океанографических данных шельфовой зоны острова Сахалин (Пищальник, Бобков, 2000а, 2000б). Модель позволяет рассчитывать изменения концентраций и изучать условия трансформации растворенных органических и минеральных компонентов — соединений N, P и Si, растворенного органического C (DOC), взвешенных компонентов (детрита и биомасс гидробионтов — гетеротрофных бактерий, фито- и зоопланктона), а также оценивать внутренние потоки вещества, включая перенос различных веществ водными массами. Электронный атлас океанографических данных позволяет оценивать состояние морской среды как по данным наблюдений оперативных съемок, так и по среднесезонным значениям гидрологических и гидрохимических параметров морской среды в комплексе для любого интересующего интервала времени в безледовый период.

Пролив Лаперуза объектом исследований выбран не случайно. С одной стороны, он включает в себя наиболее исследованный в океанологическом плане участок сахалинского шельфа — залив Анива. Эта полузамкнутая акватория может служить эталонным участком для корректировки балансов водообмена, а также потоков веществ из Охотского моря в Японское и обратно. С другой стороны, наращивание объемов добычи нефти и газа на сахалинском

шельфе, планируемое строительство в ближайшем будущем на побережье залива Анива завода по сжижению газа и терминала по его отгрузке создают потенциальную угрозу для ухудшения экологического состояния морской среды в этом богатом рыбопромысловом районе. Чтобы оценить возможные последствия возрастающей антропогенной нагрузки на морскую экосистему, необходимо, в первую очередь, корректно учитывать водообмен между Охотским и Японским морями через пролив Лаперуза, который остается еще недостаточно изученным, с неочтенным количественно до настоящего времени переносом водными массами растворенных органогенных веществ (Леонов, 1960; Радзиховская, 1961; Супранович и др., 2001; Aota, Takidzawa, 1994). В рамках данной работы впервые предоставляется возможность с помощью имитационной модели количественно оценить потоки органогенных веществ через пролив и по их величинам скорректировать расчетные результаты расчетов водообмена, полученные по гидрологическим характеристикам.

Краткая характеристика имитационной математической модели трансформации соединений органогенных элементов

Усовершенствованная версия модели рассматривает взаимосвязанные биогеохимические циклы соединений N и P, а также включает упрощенное описание важнейших потоков трансформации Si, растворенного органического C и O₂ в двухслойной водной системе. Модель учитывает основные взаимодействия природных и антропогенных факторов, их воздействия на водную экосистему, отражает имеющиеся отличия в пространственном распределении химических и биологических характеристик состояния отдельных акваторий изучаемого водного объекта. Благодаря этому модель может применяться для анализа комплекса водно-экологических задач и особенностей функционирования природных аквасистем. Сопоставление информации по отдельным акваториям внутри рассматриваемого морского объекта дает возможность выявлять и анализировать отличия, которые определяют специфику формирования запасов органогенных веществ и условия формирования биопродуктивности морской среды и, в частности, первичной продукции при заданных внешних воздействиях на морскую экосистему.

Модель рассчитывает внутригодовую динамику концентраций C, O₂, N, P и Si-содержащих веществ при их биотрансформации и развитии процессов обмена веществ через границы между выделенными акваториями внутри водоема, а также поверхностями разделов вода—воздух и вода—дно. В модели учитываются следующие соединения P, N и Si: взвешенный детритный P (PD), N (ND) и Si (SiD), растворенные органический P (DOP), N (DON) и Si (DOSi), свободный N (N₂), растворенные минеральные формы P (DIP), Si (DISi) и N — аммоний (NH₄), нитриты (NO₂) и нитраты (NO₃).

Описание процессов биотрансформации веществ в модели основано на имеющихся представлениях о круговороте веществ в водной среде, потреблении соответствующими микроорганизмами отдельных субстратов, выделении продуктов метаболизма и образовании детрита. Потребляемые микроорганизмами в процессе роста биомассы компоненты (органические и минеральные соединения органогенных элементов) могут быть взаимозаменяемыми (соединения одного элемента) и не являться таковыми (соединения разных элементов).

Гетеротрофные бактерии (B) потребляют органические соединения и дет-

рит и в процессе обмена формируют запас минеральных веществ в водной среде. Учитываемые в модели три группы фитопланктона утилизируют минеральные компоненты и образуют запас органического вещества. Анализ проводимых в 2001 г. гидробиологических наблюдений позволил на акватории пролива Лаперуза идентифицировать три доминирующие группы фитопланктона — это диатомовые, динофитовые и мелкожгутиковые водоросли. Эти группы фитопланктона обозначаются, соответственно, F1, F2 и F3. Две группы зоопланктона (растительный Z1 и хищный Z2) своей активностью регулируют динамику развития организмов сообщества и влияют на развитие продукционно-деструкционных процессов в водной среде.

Биомасса гетеротрофных бактерий вычисляется в модели в единицах C (B_c), N (B_N), P (B_p) и Si (B_{Si}); диатомовых водорослей — в единицах Si ($F1_{Si}$), N ($F1_N$) и P ($F1_p$); динофитовых, мелкожгутиковых водорослей — в единицах N ($F2_N$, $F3_N$) и P ($F2_p$, $F3_p$); растительного зоопланктона — в единицах Si ($Z1_{Si}$), N ($Z1_N$) и P ($Z1_p$), хищного зоопланктона — в единицах N ($Z2_N$) и P ($Z2_p$).

Фактически модель воспроизводит развитие процессов изменения концентраций веществ и биомасс микроорганизмов, отражая реакцию водной экосистемы на условия среды обитания или на изменения хотя бы одного из учитываемых в модели внешних факторов (водный режим, температура, освещенность, прозрачность, биогенная нагрузка). Переходное состояние рассматривается в модели для каждой выделенной акватории внутри водного объекта и может быть исследовано по широкому набору расчетных показателей (концентрации веществ, скорости отдельных процессов, внутренним потокам веществ по всем рассматриваемым каналам трансформации, биогенной нагрузке, продуктивности отдельных звеньев трофической цепи, балансам веществ и др.) для характеристики условий биотрансформации веществ в морских акваториях.

Структура уравнений модели подробно рассмотрена в работе (Леонов, Сапожников, 1997). Модель прошла апробацию при исследовании условий трансформации соединений органогенных элементов на пресноводных объектах (Леонов и др., 1996; Назаров, Леонов, 1999), а также при изучении экосистем Охотского (Леонов, Сапожников, 1997) и Каспийского (Леонов, Стыгар, 2001) морей.

Подготовка входных данных для расчетов динамики органогенных веществ в водной среде с помощью электронного атласа

Электронный атлас позволяет оперативно работать с океанографической информацией и производить ее обработку (картирование, построение разрезов, графиков годового хода и вертикального распределения характеристик, осреднение информации по пространству и времени, получение статистических характеристик и вычисление аномалий). Это дает возможность использовать данные любой конкретной океанологической съемки для тестирования модели в режиме реального времени и адаптировать ее для любого типа условий среды обитания в средние (нормальные), теплые или холодные годы. Благодаря атласу существенно упрощается самая трудоемкая часть работы по подготовке исходных данных для гидроэкологической модели, а сам процесс моделирования условий трансформации органогенных веществ становится более оперативным и информационно емким. Это позволяет апробировать широкий спектр сценарных вариантов по изменению природных условий и возмож-

ным эффектам антропогенного воздействия на морские акватории в исследуемом регионе.

В качестве исходных данных в имитационную модель закладывались среднесуточные значения гидрологических и гидрохимических параметров морской среды из океанографического атласа шельфовой зоны острова Сахалин. Основные принципы подготовки исходных данных для расчета средних величин и сами методы расчета освещены в ряде работ (Пищальник, 1997; Пищальник, Бобков, 2000а, 2000б). Не останавливаясь подробно на изложении этих вопросов, отметим лишь ключевые моменты, необходимые для понимания особенностей выполнения расчетов и получения среднесуточных величин.

Для района исследований, ограниченного с севера и юга побережьями островов Сахалин и Хоккайдо, а с запада и востока, соответственно, $141^{\circ}50'$ с. ш. и $143^{\circ}39'$ в. д., анализировались данные судовых наблюдений, выполненных на стандартных разрезах с 1948 по 1994 г. (рис. 1). Всего на данной акватории в безледовый период было сделано более 6 тыс. океанографических станций, на которых было выполнено около 14 тыс. наблюдений за различными параметрами состояния морской среды. Данные всего исторического ряда наблюдений усреднялись «скользящим окном», и вычислялись ежемесячные значения характеристик для каждой станции на всех стандартных горизонтах (0, 10, 20, 30, 50, 75 и 100 м), которые затем интерполировались в узлах регулярной сетки (с шагом 10×10 км).

Таким образом, для всех наблюдаемых и расчетных океанографических параметров (температура, соленость, условная плотность, рН воды, концентрации растворенного кислорода, фосфатов, нитритов и силикатов) были сформированы трехмерные матрицы данных, которые явились основой для расчета средневзвешенных величин параметров в слоях и для вычисления переноса вод в геострофическом приближении.

С целью определения величин потоков вещества внутри исследуемого района его акватория с учетом характерных особенностей гидрологического и гидрохимического режима дополнительно была разделена на участки (рис. 1). Воды первых трех участков относятся к субарктической структуре вод, воды течения Соя — к субтропической (Пищальник, Архипкин, 2000).

Объемы вод выделенных участков 1–4 были рассчитаны по крупномасштабным картам и составили, соответственно, 317, 130,2, 766,7 и 255,1 км³, а средние глубины — 47, 69, 116 и 48 м. На внутренних и внешних границах всех участков рассчитывались средневзвешенные значения параметров морской среды для двух слоев — выше и ниже слоя

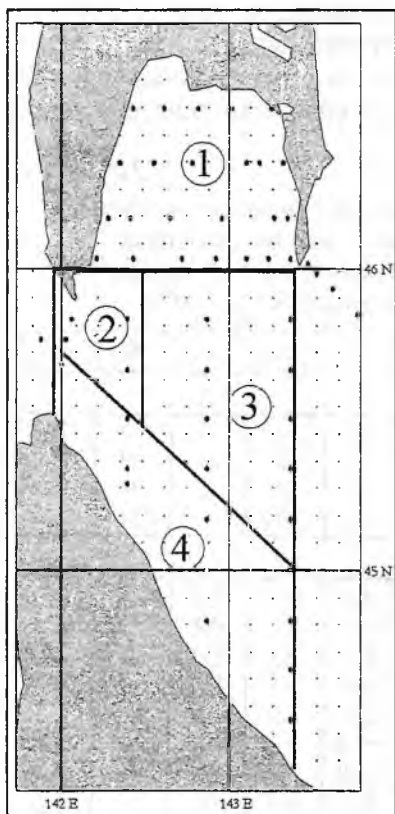


Рис. 1. Схема подразделения исследуемой акватории на участки: 1 — залив Анива; 2 — район апвеллинга вод около скалы Камень Опасности; 3 — зона Восточно-Сахалинского течения; 4 — зона течения Соя.

скачка плотности, определяемого для каждого месяца по вертикальному распределению температуры воды. Основной набор параметров водной среды, оцененный с помощью электронного атласа океанографических данных, представлен в табл. 1. Глубина положения термоклина для участков 1—4 в январе-апреле и декабре принята равной 20 м (для оценки верхнего охлажденного слоя течения Соя), в мае-июле и ноябре — 30 м, в августе-сентябре — 42—50 м. В октябре на участках 1 и 4 она составляла 42—43 м, а на участках 2 и 3 — 64 и 75 м соответственно. Таким образом, на участках 1 и 4 в августе-октябре весь столб воды перемешивается практически до дна, на участке 2 такая ситуация отмечается только в октябре. На участке 3 средняя глубина выше, чем на участках 1, 2 и 4, и перемешивание вод в указанные месяцы распространяется до глубин 50—75 м, не достигая дна (табл. 1).

Анализ среднесезонных значений температуры воды показывает, что в поверхностном слое в субарктической структуре (участки 1—3) температура в январе-апреле отрицательная и меняется в диапазоне от $-0,7$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$. В субтропической структуре (участок 4) отрицательные температуры воды (от $-0,5$ до $-0,8^{\circ}\text{C}$) отмечаются лишь в феврале-марте. В нижнем слое в январе на участках 1—4 температура воды не достигает отрицательных значений и составляет $0,7$, $0,6$, $0,7$ и 3°C соответственно. Охлаждение воды в нижнем слое происходит позже, чем в поверхностном, поэтому отрицательные температуры в субарктической структуре отмечаются лишь в феврале-апреле (от $-0,7$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$). В субтропической зоне за счет активного воздействия тече-

Таблица 1

Среднесезонные значения параметров морской среды по месяцам для участков 1—4 на акватории залив Анива — пролив Лаперуза (Глубина залегания термоклина и температура воды по данным СахНИРО, освещенность и фотопериод по: Научно-прикладной..., 1990)

Участок	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Глубина термоклина, м												
1	20	20	20	20	30	30	30	42	42	42	30	20
2	20	20	20	20	30	30	30	50	50	64	30	20
3	20	20	20	20	30	30	30	50	50	75	30	20
4	20	20	20	20	30	30	30	43	43	43	30	20
Температура, $^{\circ}\text{C}$												
1	<u>-0,7</u>	<u>-1,5</u>	<u>-1,4</u>	<u>-0,4</u>	<u>2,4</u>	<u>5,6</u>	<u>9,2</u>	<u>10,0</u>	<u>11,0</u>	<u>9,0</u>	<u>6,2</u>	<u>2,2</u>
	0,7	-1,3	-1,5	-1,1	-0,2	0,8	1,6	0,2	0,6	0,8	5,5	2,6
2	<u>-0,7</u>	<u>-1,5</u>	<u>-1,5</u>	<u>-0,7</u>	<u>2,4</u>	<u>4,4</u>	<u>7,0</u>	<u>8,2</u>	<u>8,4</u>	<u>7,6</u>	<u>5,5</u>	<u>2,1</u>
	0,6	-1,0	-1,5	-0,9	2,3	3,5	4,5	0,2	0,5	0,8	5,3	2,6
3	<u>-0,7</u>	<u>-1,5</u>	<u>-1,3</u>	<u>-0,2</u>	<u>2,4</u>	<u>4,2</u>	<u>8,5</u>	<u>7,0</u>	<u>8,0</u>	<u>6,0</u>	<u>4,2</u>	<u>1,7</u>
	0,7	-0,7	-1,0	-1,3	-0,1	0,3	0,4	-0,5	0,1	0,5	3,0	1,9
4	<u>0,3</u>	<u>-0,8</u>	<u>-0,5</u>	<u>2,0</u>	<u>5,0</u>	<u>7,5</u>	<u>11,0</u>	<u>14,0</u>	<u>12,0</u>	<u>9,0</u>	<u>7,0</u>	<u>2,5</u>
	3,0	1,2	1,5	2,0	4,5	7,0	7,0	6,0	3,0	4,0	8,0	4,0
Освещенность, кал/(cm^2 сут.)												
1—4	112,9	142,8	209,7	266,7	274,2	300,0	274,2	258,1	250,0	161,0	150,0	112,9
Фотопериод												
1—4	0,34	0,41	0,49	0,59	0,64	0,69	0,67	0,60	0,52	0,44	0,36	0,34

В числителе значения для верхнего слоя, в знаменателе — для нижнего.

ния Соя температура воды нижнего слоя в период февраль—апрель всегда положительна — 1,2—2°C.

Среднегодовое значения освещенности поверхности моря и продолжительности светового дня взяты из справочника (Научно-прикладной..., 1990). Наибольшие значения этих показателей отмечены в мае—июле, наименьшие — в январе и декабре. Эти характеристики приняты одинаковыми для всех исследованных акваторий.

Перенос водных масс для двух слоев через границы акваторий (рис. 1) оценивался двумя методами: 1) расчетами в геострофическом приближении, для которого присущи некоторые недостатки при использовании в мелководных районах (Архипкин, 1992); 2) методом баланса с использованием данных инструментальных наблюдений за скоростями течений, учетом колебаний уровня моря и внутригодовых изменений объемов водных масс (Пищальник, Архипкин, 2000; Поезжалова, Шевченко, 1997; Супранович и др., 2000; Aota, Takidzawa, 1994). В балансовом методе инструментальные данные конкретного года корректировались с учетом среднегодовое колебаний уровня и объема поверхностной тихоокеанской водной массы. В этих двух вариантах расчетов первоначально оцененный водный баланс сводился к нулю в заливе Анива, после чего методом баланса корректировались потоки на внутренних, а затем и внешних границах. Вычисленные по обоим методам расходы воды через границы участков 1—4 приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Анализ полученных по двум методам величин расходов воды между участками 1—4 показывает, что на их внутренних границах значения расходов воды в целом отличаются меньше, чем на внешних (табл. 2 и 3). Для залива Анива (участок 1) расчетные значения расходов воды по двум методам остаются одинаковыми. Отличий нет также в значениях расходов воды для потоков из 3-го в 1-й участок и в потоках (поступление/вынос) через границу участка 3 с Охотским морем. Значения переноса из 2-го в 3-й участок хотя и отличаются, но характеризуются одинаковым порядком расчетных величин. В величинах потоков внутри выделенных участков 1—4 наибольшие расхождения отмечены в значениях переноса из 2-го в 4-й участок: в отдельные месяцы величины расходов, оцененные по балансовому методу, выше для поверхностного слоя в 18,4—160 раз, чем расчетные значения по геострофическому методу. Также выше оцененные по методу баланса значения расходов воды для потоков между участками 4 и 3 (соответственно, в 1,7—17,7 раза для переноса из участка 4 в 3 и в 1,2—2,5 раза для обратного потока). Однако оцененные по методу баланса значения поступающих на участок 2 потоков из участков 3 и 4 меньше, чем таковые по геострофическому методу (соответственно, в 0,6—0,9 и 0,1—0,9 раза).

Наибольшие отличия в расчетных значениях расходов воды получены для внешнего водообмена с Японским (участки 2 и 4) и Охотским (участок 4) морями. Рассчитанные методом баланса поступления в участок 2 потоков из Японского моря в 7—15 раз выше, чем рассчитанные геострофическим методом. Обратный поток (из участка 2 в Японское море), напротив, слабее в 0,6—0,9 раза. Основные отличия наблюдаются в период максимального развития течения Соя в июле—августе. Интенсивность потоков на участке 4 (из Японского моря и обратно), оцененная балансовым методом, выше в 4—235 раз в сравнении со значениями, вычисленными геострофическим методом. Оцененный методом баланса на границе с Охотским морем водообмен на участке 4 также выше: поток

Среднемноголетние ежемесячные значения расходов воды, оцененные геострофическим методом, на границах участков 1–4, обмен с внешними акваториями (Японское/Охотское море) и перенос по вертикали (км³) (данные СахНИРО)

Перенос из	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 ⇒ 2	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>0.0</u> 0,0	<u>34.6</u> 37,1	<u>0.0</u> 10,1
1 ⇒ 3	<u>17.7</u> 19,9	<u>30.4</u> 31,9	<u>41.7</u> 42,7	<u>63.2</u> 63,7	<u>127.6</u> 58,4	<u>144.9</u> 52,9	<u>258.8</u> 64,4	<u>283.7</u> 4,7	<u>425.7</u> 23,9	<u>137.1</u> 5,7	<u>4.1</u> 2,6	<u>33.3</u> 35,6
2 ⇒ 1	<u>17.0</u> 9,5	<u>16.3</u> 9,8	<u>15.6</u> 10,2	<u>14.8</u> 10,5	<u>33.3</u> 14,3	<u>55.5</u> 19,2	<u>88.0</u> 27,7	<u>119.6</u> 5,3	<u>111.9</u> 7,3	<u>94.6</u> 0,0	<u>11.4</u> 5,8	<u>17.6</u> 12,3
2 ⇒ 3	<u>15.0</u> 7,4	<u>10.0</u> 10,0	<u>15.0</u> 10,0	<u>15.0</u> 15,0	<u>15.0</u> 15,0	<u>15.0</u> 15,0	<u>15.0</u> 10,0	<u>20.0</u> 10,0	<u>20.0</u> 5,0	<u>20.0</u> 0,0	<u>5.3</u> 5,0	<u>10.0</u> 10,0
2 ⇒ 4	<u>9.8</u> 6,2	<u>2.8</u> 3,2	<u>3.2</u> 7,8	<u>2.2</u> 8,2	<u>2.5</u> 13,1	<u>21.7</u> 3,4	<u>20.7</u> 3,3	<u>22.3</u> 148,8	<u>29.6</u> 143,9	<u>18.2</u> 0,0	<u>13.9</u> 4,8	<u>8.9</u> 5,9
3 ⇒ 1	<u>23.2</u> 53,0	<u>17.3</u> 40,5	<u>11.9</u> 29,3	<u>4.8</u> 14,0	<u>64.5</u> 38,8	<u>37.4</u> 20,2	<u>66.5</u> 22,8	<u>71.0</u> 5,3	<u>187.9</u> 20,7	<u>173.7</u> 1,8	<u>143.4</u> 111,3	<u>60.5</u> 109,5
3 ⇒ 2	<u>92.0</u> 113,4	<u>107.7</u> 122,6	<u>123.3</u> 141,9	<u>155.0</u> 157,8	<u>201.0</u> 187,0	<u>193.0</u> 187,9	<u>205.0</u> 160,3	<u>250.5</u> 147,8	<u>302.3</u> 147,5	<u>242.1</u> 0,0	<u>59.1</u> 57,6	<u>76.8</u> 110,8
3 ⇒ 4	<u>50.0</u> 5,9	<u>45.0</u> 1,8	<u>50.0</u> 1,5	<u>60.0</u> 3,8	<u>85.0</u> 65,0	<u>85.0</u> 11,0	<u>220.0</u> 70,0	<u>350.0</u> 7,0	<u>330.0</u> 10,0	<u>270.0</u> 95,0	<u>130.0</u> 80,0	<u>250.0</u> 30,0
4 ⇒ 2	<u>100.0</u> 65,0	<u>70.0</u> 65,0	<u>70.0</u> 50,0	<u>50.0</u> 50,0	<u>80.0</u> 50,0	<u>130.0</u> 55,0	<u>150.0</u> 50,0	<u>320.0</u> 6,3	<u>330.0</u> 3,7	<u>240.0</u> 0,0	<u>160.0</u> 80,0	<u>130.0</u> 85,0
4 ⇒ 3	<u>1.2</u> 45,0	<u>5.8</u> 23,0	<u>5.5</u> 20,0	<u>1.6</u> 30,0	<u>7.9</u> 4,9	<u>5.5</u> 1,3	<u>17.7</u> 3,5	<u>17.8</u> 0,6	<u>24.5</u> 2,7	<u>28.7</u> 2,4	<u>23.1</u> 10,3	<u>14.4</u> 4,7
Поступление из внешних акваторий (Японское/Охотское море)												
2	<u>30.0</u> 40,0	<u>30.0</u> 40,0	<u>40.0</u> 40,0	<u>40.0</u> 40,0	<u>50.0</u> 40,0	<u>55.0</u> 45,0	<u>30.0</u> 20,0	<u>50.0</u> 0,0	<u>70.0</u> 0,0	<u>50.0</u> 0,0	<u>25.0</u> 20,0	<u>20.0</u> 190,0
3	<u>161.3</u> 120,0	<u>153.8</u> 120,0	<u>153.0</u> 120,0	<u>180.0</u> 76,9	<u>250.0</u> 262,5	<u>200.0</u> 189,9	<u>240.0</u> 205,2	<u>430.0</u> 178,8	<u>420.0</u> 181,6	<u>600.0</u> 104,9	<u>350.0</u> 261,0	<u>379.6</u> 230,0
4	<u>50.5</u> 109,0	<u>30.0</u> 85,0	<u>25.0</u> 65,0	<u>27.4</u> 72,2	<u>26.4</u> 31,1	<u>118.0</u> 91,9	<u>137.0</u> 105,2	<u>351.5</u> 9,9	<u>287.3</u> 11,4	<u>44.9</u> 2,4	<u>110.0</u> 65,0	<u>46.0</u> 170,0
Вынос во внешние акватории (Японское/Охотское море)												
2	<u>180.2</u> 195,3	<u>178.5</u> 204,6	<u>199.5</u> 103,9	<u>213.0</u> 214,1	<u>280.2</u> 233,9	<u>285.8</u> 250,3	<u>261.3</u> 189,3	<u>458.6</u> 0,0	<u>540.8</u> 0,0	<u>399.3</u> 0,0	<u>248.1</u> 179,1	<u>190.3</u> 197,7
3	<u>30.0</u> 20,0	<u>30.0</u> 20,0	<u>30.0</u> 20,0	<u>40.0</u> 10,0	<u>50.0</u> 50,0	<u>50.0</u> 50,0	<u>40.0</u> 30,0	<u>80.0</u> 40,0	<u>70.0</u> 40,0	<u>100.0</u> 16,2	<u>50.0</u> 30,0	<u>50.0</u> 30,0
4	<u>9.1</u> 11,1	<u>2.0</u> 2,0	<u>2.7</u> 4,3	<u>38.0</u> 4,0	<u>26.0</u> 55,0	<u>90.0</u> 50,0	<u>210.0</u> 125,0	<u>386.0</u> 158,8	<u>292.4</u> 158,9	<u>64.4</u> 95,0	<u>70.8</u> 59,5	<u>160.5</u> 116,2
Обмен по вертикали в акваториях												
1	13,49	13,49	12,14	10,79	12,14	10,11	8,092	8,499	5,666	11,33	12,14	10,79
2	2,264	2,00	2,00	2,264	3,963	3,963	4,528	7,548	8,492	10,87	5,095	2,642
3	5,287	5,287	11,90	10,58	11,900	9,914	7,931	9,914	6,609	19,830	11,900	6,61
4	5,314	5,314	5,314	10,63	15,94	23,91	31,89	45,71	45,71	34,28	15,94	5,314

В числителе значения для верхнего слоя, в знаменателе – для нижнего.

Таблица 3

Среднемноголетние ежемесячные значения расходов воды, оцененные по методу баланса, на границах участков 1–4, обмен с внешними акваториями (Японское/Охотское море) и перенос по вертикали (км³) (данные СахНИРО)

Перенос из	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 ⇒ 2	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>0,0</u> 0,0	<u>34,6</u> 37,1	<u>0,0</u> 10,1
1 ⇒ 3	<u>17,7</u> 19,9	<u>30,4</u> 31,9	<u>41,7</u> 42,7	<u>63,2</u> 63,7	<u>127,6</u> 58,4	<u>144,9</u> 52,9	<u>258,8</u> 64,4	<u>283,7</u> 4,7	<u>425,7</u> 23,9	<u>137,1</u> 5,7	<u>4,1</u> 2,6	<u>33,3</u> 35,6
2 ⇒ 1	<u>17,0</u> 9,5	<u>16,3</u> 9,8	<u>15,6</u> 10,2	<u>14,8</u> 10,5	<u>33,3</u> 14,3	<u>55,5</u> 19,2	<u>88,0</u> 27,7	<u>119,6</u> 5,3	<u>111,9</u> 7,3	<u>94,6</u> 0,0	<u>11,4</u> 5,8	<u>17,6</u> 12,3
2 ⇒ 3	<u>10,0</u> 10,0	<u>10,0</u> 10,0	<u>10,0</u> 10,0	<u>10,0</u> 15,0	<u>15,0</u> 10,0	<u>15,0</u> 15,0	<u>20,0</u> 10,0	<u>20,0</u> 3,0	<u>20,0</u> 5,0	<u>20,0</u> 0,0	<u>2,0</u> 0,9	<u>10,0</u> 10,0
2 ⇒ 4	<u>200,0</u> 200,0	<u>220,0</u> 210,0	<u>230,0</u> 300,0	<u>400,0</u> 400,0	<u>400,0</u> 400,0	<u>400,0</u> 400,0	<u>400,0</u> 400,0	<u>756,0</u> 15,5	<u>762,0</u> 17,2	<u>600,0</u> 0,0	<u>306,0</u> 220,0	<u>200,0</u> 200,0
3 ⇒ 1	<u>23,2</u> 53,0	<u>17,3</u> 40,5	<u>11,9</u> 29,3	<u>4,8</u> 14,0	<u>64,5</u> 38,8	<u>37,4</u> 20,2	<u>66,5</u> 22,8	<u>71,0</u> 5,3	<u>187,9</u> 20,7	<u>173,7</u> 1,8	<u>143,4</u> 111,3	<u>60,5</u> 109,5
3 ⇒ 2	<u>57,0</u> 64,4	<u>62,7</u> 72,6	<u>73,3</u> 76,9	<u>89,6</u> 91,9	<u>121,0</u> 106,0	<u>118,1</u> 101,5	<u>140,0</u> 93,8	<u>204,5</u> 21,8	<u>255,0</u> 27,5	<u>158,9</u> 0,0	<u>51,1</u> 33,5	<u>56,8</u> 66,9
3 ⇒ 4	<u>100,0</u> 20,0	<u>100,0</u> 30,0	<u>100,0</u> 60,0	<u>150,0</u> 60,0	<u>200,0</u> 150,0	<u>200,0</u> 120,0	<u>322,3</u> 150,0	<u>500,0</u> 139,4	<u>452,8</u> 142,3	<u>404,5</u> 113,8	<u>151,6</u> 120,0	<u>300,0</u> 80,0
4 ⇒ 2	<u>20,4</u> 10,4	<u>14,5</u> 11,8	<u>33,7</u> 17,2	<u>42,8</u> 37,8	<u>44,9</u> 57,2	<u>51,5</u> 68,0	<u>55,5</u> 43,2	<u>90,0</u> 2,0	<u>100,0</u> 2,0	<u>108,0</u> 0,0	<u>50,0</u> 25,2	<u>11,1</u> 16,1
4 ⇒ 3	<u>21,2</u> 7,5	<u>15,8</u> 1,2	<u>10,5</u> 13,5	<u>26,4</u> 20,3	<u>42,9</u> 13,9	<u>45,6</u> 33,9	<u>50,0</u> 17,0	<u>121,8</u> 20,0	<u>100,0</u> 20,0	<u>80,0</u> 20,0	<u>40,0</u> 30,3	<u>44,4</u> 10,8
Поступление из внешних акваторий (Японское/Охотское море)												
2	<u>200,0</u> 190,0	<u>220,0</u> 190,0	<u>310,0</u> 290,0	<u>360,0</u> 360,0	<u>380,0</u> 355,0	<u>410,0</u> 335,0	<u>450,0</u> 380,0	<u>770,0</u> 0,0	<u>740,0</u> 0,0	<u>590,0</u> 0,0	<u>260,0</u> 190,0	<u>210,0</u> 190,0
3	<u>161,3</u> 120,0	<u>153,8</u> 120,0	<u>153,0</u> 120,0	<u>180,0</u> 76,9	<u>250,0</u> 262,5	<u>200,0</u> 189,9	<u>240,0</u> 205,2	<u>430,0</u> 178,8	<u>420,0</u> 181,6	<u>600,0</u> 104,9	<u>350,0</u> 261,0	<u>379,6</u> 230,0
4	<u>341,6</u> 347,9	<u>370,3</u> 323,0	<u>494,2</u> 440,7	<u>499,2</u> 478,1	<u>607,8</u> 556,1	<u>687,0</u> 566,9	<u>750,0</u> 710,2	<u>1220,0</u> 15,0	<u>1190,0</u> 10,0	<u>960,0</u> 10,0	<u>430,4</u> 340,0	<u>350,0</u> 330,0
Вынос во внешние акватории (Японское/Охотское море)												
2	<u>50,4</u> 45,3	<u>50,9</u> 44,6	<u>61,4</u> 63,9	<u>62,8</u> 64,2	<u>97,5</u> 93,9	<u>109,1</u> 70,3	<u>135,5</u> 79,3	<u>168,3</u> 0,0	<u>200,3</u> 0,0	<u>142,3</u> 0,0	<u>76,3</u> 59,1	<u>50,3</u> 80,8
3	<u>30,0</u> 20,0	<u>30,0</u> 20,0	<u>30,0</u> 20,0	<u>40,0</u> 10,0	<u>50,0</u> 50,0	<u>50,0</u> 50,0	<u>40,0</u> 30,0	<u>80,0</u> 40,0	<u>70,0</u> 40,0	<u>100,0</u> 16,2	<u>50,0</u> 30,0	<u>50,0</u> 30,0
4	<u>600,0</u> 550,0	<u>660,0</u> 550,0	<u>880,0</u> 770,0	<u>980,0</u> 880,0	<u>1120,0</u> 1035,0	<u>1100,0</u> 985,0	<u>1367,0</u> 1200,0	<u>2265,0</u> 149,9	<u>2206,0</u> 149,9	<u>1776,0</u> 103,8	<u>768,0</u> 624,5	<u>804,5</u> 583,1
Обмен по вертикали в акваториях												
1	13,49	13,49	12,14	10,79	12,14	10,11	8,092	8,499	5,666	11,33	12,14	10,79
2	2,264	2,00	2,00	2,264	3,963	3,963	4,528	7,548	8,492	10,87	5,095	2,642
3	5,287	5,287	11,90	10,58	11,900	9,914	7,931	9,914	6,609	19,830	11,900	6,61
4	5,314	5,314	5,314	10,63	15,94	23,91	31,89	45,71	45,71	34,28	15,94	5,314

В числителе значения для верхнего слоя, в знаменателе – для нижнего.

из участка 4 в Охотское море выше в 7–15 раз, а обратный поток — в 6–1300 раз. Наибольшие отличия в скоростях потоков приходится на период начала активизации течения Соя в марте–мае (табл. 2 и 3).

Принятые для участков 1–4 значения прозрачности водной среды составляют 6–13 м, они наименьшие в сентябре–октябре и наибольшие в зимние месяцы.

По данным о расходах воды речного стока и концентрациям биогенных веществ в речной воде для каждого месяца были вычислены скорости поступления биогенных веществ в воды залива Анива. Биогенная нагрузка на участки 2–4 оценивалась с учетом информации, имеющейся в электронном атласе океанографических данных о концентрациях растворенного кислорода, фосфатов, нитритов и силикатов в прилегающих акваториях Японского и Охотского морей. Для получения информации о возможно более широком спектре биогенных веществ, поступающих в воды участков 2–4, использовались также литературные данные (Бруевич и др., 1960; Conkright et al., 1994), которые позволили оценить весовые соотношения концентраций биогенных веществ в морских водах этого региона ($\text{NO}_3/\text{NO}_2 \sim 50$; $\text{NH}_4/\text{NO}_2 \sim 10$; $\text{DON}/\text{N}_{\text{min}} \sim 5$; $\text{DON}/\text{ND} \sim 5$; $\text{DOC}/\text{DON} \sim 5$; $\text{DOP}/\text{DIP} \sim 6$; $\text{DOP}/\text{PD} \sim 5$). С их помощью рассчитывались ориентировочные скорости поступления биогенных веществ на участки 2–4 с водами из Японского и Охотского морей в разные месяцы. Эти скорости были включены в массивы входных данных модели, определяющих биогенную нагрузку морских акваторий на участках 1–4.

Результаты моделирования и их анализ

Расчеты на модели для календарного года (с 1 января по 31 декабря) выполнялись по заданным среднеголетним характеристикам состояния водной среды (температура воды, освещенность, водообмен, концентрация биогенных веществ) с шагом 0,05 сут. методом Рунге-Кутты-4. Возможности совместного использования модели и электронного океанографического атласа показаны на примере рассмотрения расчетной динамики соединений N, P, DiSi и DOC. Результаты расчетов внутригодовой динамики $\text{N}_{\text{общ}}$ и $\text{P}_{\text{общ}}$, а также отдельных фракций N (DON , NH_4 , NO_2 , NO_3 и ND), для периода рециклинга биогенных веществ (в частности, NO_3 для 150–365 суток), соединений P (DOP , DIP и PD), концентраций N в биомассах планктона (фито- и зоопланктона) в поверхностном слое на участках 1–4 приведены, соответственно, на рис. 2–6. Левая колонка графиков на указанных рисунках показывает результаты динамики веществ геострофическим методом (расчетный вариант 1), а правая колонка — по методу баланса (расчетный вариант 2).

Анализ полученных результатов моделирования проводится, с одной стороны, для качественного выяснения возможности модели воспроизвести сезонные колебания концентраций биогенных веществ и биомасс планктонных организмов, а с другой — с целью выяснения влияния заданного переноса веществ, оцененного двумя разными методами, на динамику концентраций соединений биогенных элементов. В целом, можно сказать, что модель в вариантах 1 и 2 воспроизводит типичное для водных экосистем внутригодовое изменение концентраций биогенных веществ и биомасс гидробионтов. В зимний период содержание органических и минеральных компонентов в водной среде накапливается; весной оно уменьшается из-за повышения активности гидробионтов; летом концентрации минеральных компонентов остаются на низком уровне, а

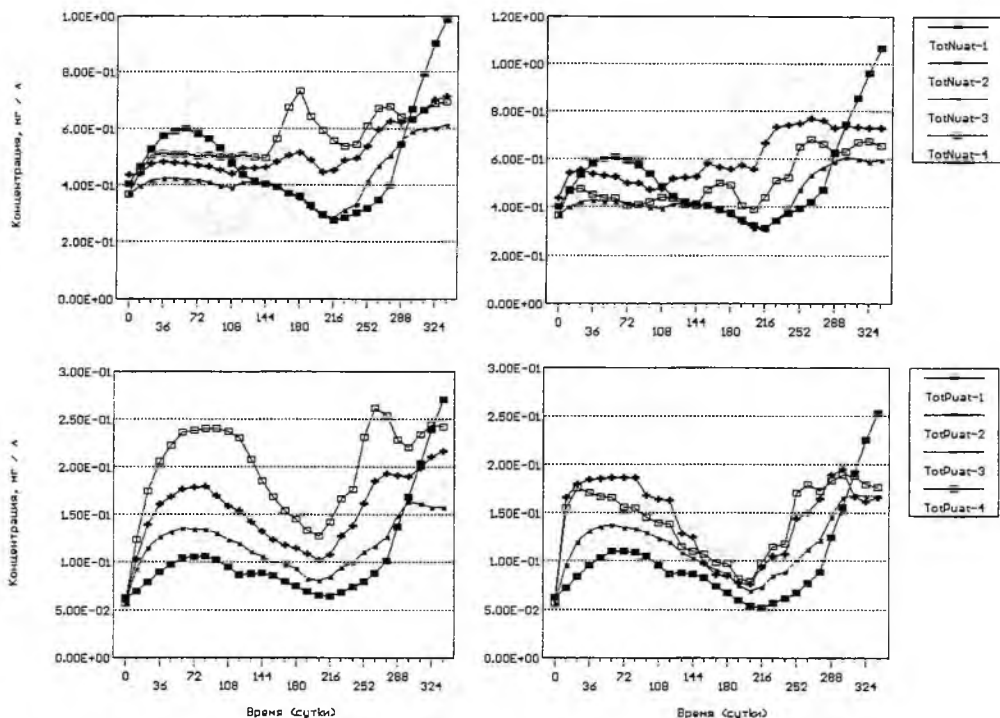


Рис. 2. Расчетная динамика внутригодовых изменений концентраций $N_{\text{общ}}$ (верхние рис.) и $P_{\text{общ}}$ (нижние рис.). Здесь и на рис. 4–7 слева – при расчете переноса на границах выделенных участков геострофическим методом, справа – по методу баланса.

органических увеличиваются за счет интенсификации процессов продуцирования органического вещества. К концу осени – началу зимы активность гидробионтов снижается, и содержание минеральных, а также растворенных органических компонентов в водной среде начинает возрастать.

Различия в заданных скоростях пространственного переноса веществ в вариантах 1 и 2 приводят к некоторым отличиям в моделируемой внутригодовой динамике концентраций биогенных веществ и биомасс планктонных организмов (рис. 3–7). Отметим, однако, что годовая динамика соединений N и P в районах 1 и 3 мало отличается в вариантах 1 и 2, а основные отличия обнаруживаются в динамике указанных веществ в районах 2 и 4, для которых наиболее значимые различия в заданных скоростях переноса веществ (табл. 2 и 3) обусловлены динамикой водообмена и временным фактором.

В заливе Анива (участок 1) внутригодовых отличий в динамике концентраций $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ в вариантах 1 и 2 практически нет, так как в них значения водообмена с соседними акваториями неизменны и влияние переноса вещества из участков 2 и 3 несущественно (рис. 2). В зимние месяцы содержание $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ возрастает. Однако тенденции внутригодовой изменчивости концентраций $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ на разных участках отличаются. Зимой наибольший рост концентраций $N_{\text{общ}}$ отмечен в заливе Анива (до 0,6 мг N/л), наименьший – на участке 3 (до 0,41 мг N/л). Весной и летом содержание $N_{\text{общ}}$ на участке 1 и 3 снижается и к началу августа достигает минимума (в варианте 1 – 0,27 мг N/л, в варианте 2 – 0,31 мг N/л) и затем начинает возрастать до максимальных значений к концу года. В акваториях 2–4 содержание $N_{\text{общ}}$ весной и летом

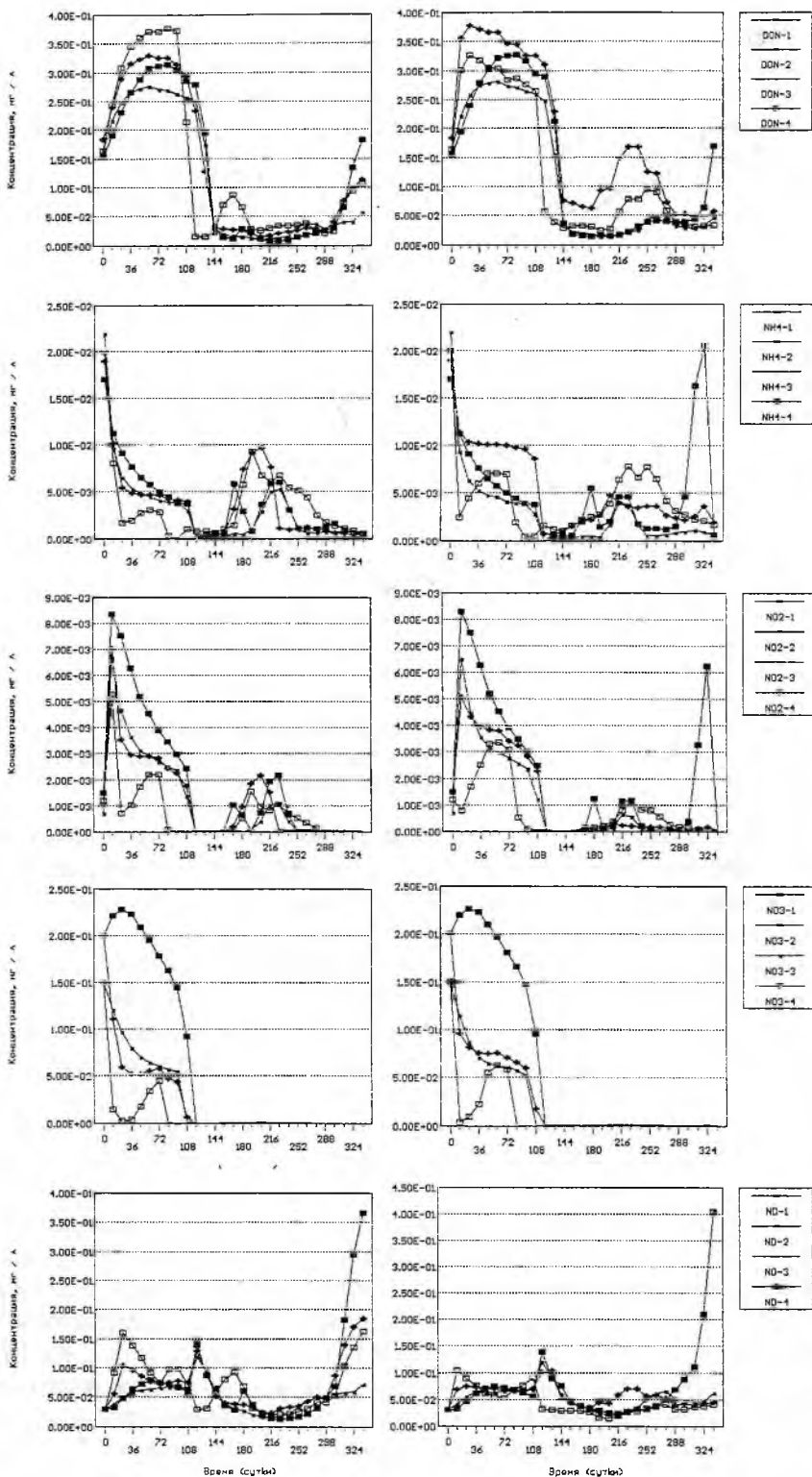


Рис. 3. Расчетная динамика внутригодовых изменений концентраций форм N – DON, NH₄, NO₂, NO₃ и ND.

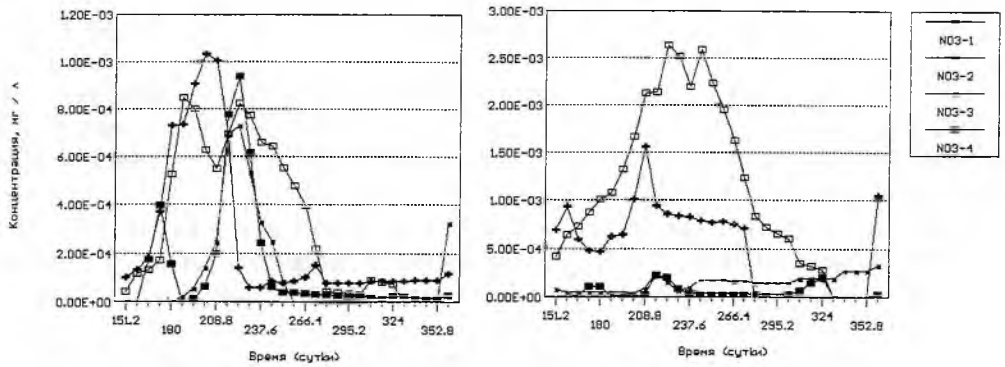


Рис. 4. Расчетная динамика изменений концентраций NO_3 (для периода 150–365 суток).

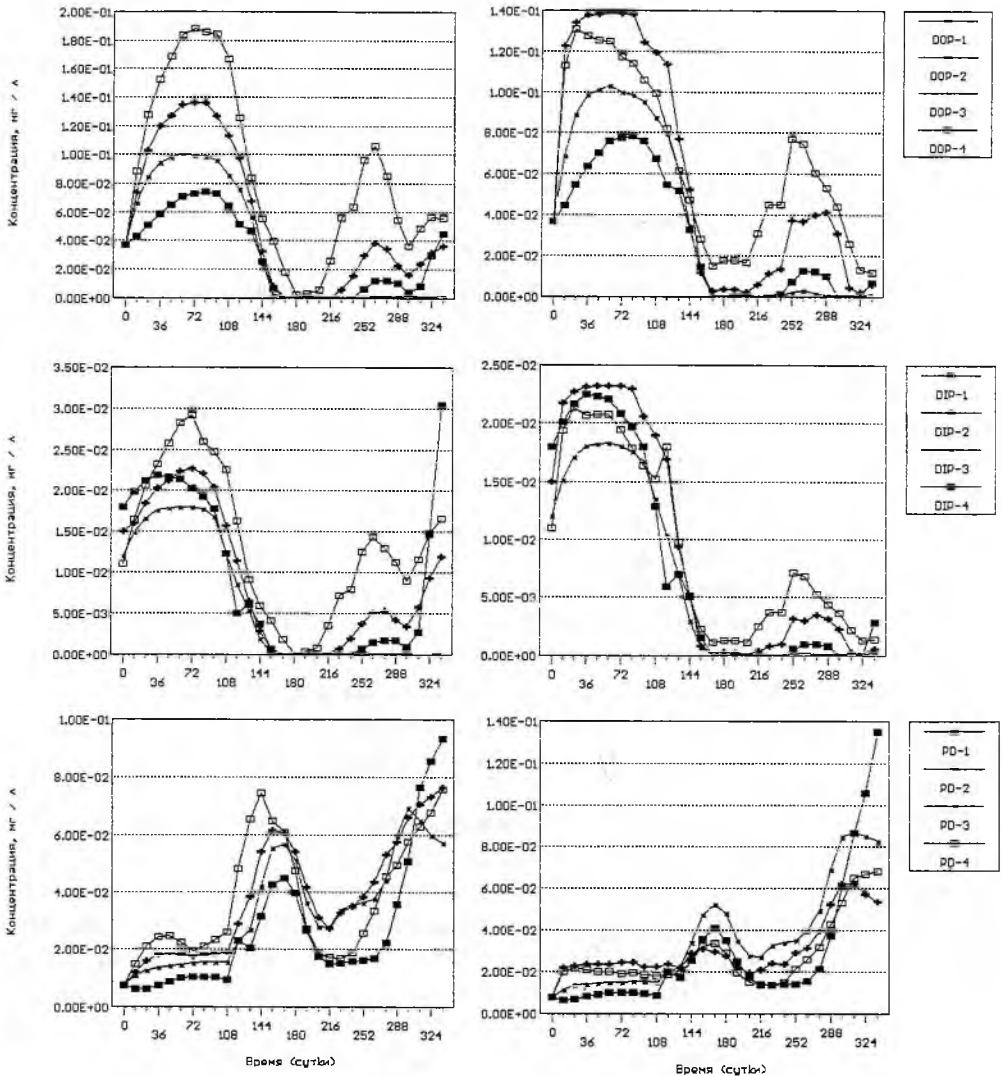


Рис. 5. Расчетная динамика внутригодовых изменений концентраций форм P – DOP , DIP и PD .

колеблется, однако прослеживается общая тенденция его возрастания к концу года. Концентрация $P_{\text{общ}}$ наибольшая зимой на участке 4 (до 0,24 мг P/л — вариант 1) или на участке 2 (0,18 мг P/л — вариант 2), а наименьшая на участке 1 (0,11 мг P/л). Весной и летом концентрации $P_{\text{общ}}$ на всех участках снижаются до минимума к началу августа. Отличия в концентрациях $P_{\text{общ}}$ в летний минимум в разных районах выше в варианте 1, чем в варианте 2. К концу года содержание $P_{\text{общ}}$ повсеместно возрастает, причем наибольшее увеличение происходит в заливе Анива (до 0,27 и 0,25 мг P/л в вариантах 1 и 2 соответственно). Однако принципиально кривые годового хода концентраций указанных веществ в вариантах 1 и 2 отличаются мало, обнаруживая общую тенденцию увеличения концентраций $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ к концу года. Основные отличия в вариантах 1 и 2 отмечаются в амплитуде внутрigoдовых колебаний концентраций веществ, которые максимальны в заливе Анива (рис. 2).

Содержание DON зимой выше в зоне течения Соя (вариант 1) или в районе Камня Опасности (вариант 2). К маю-июню содержание DON в поверхностном слое снижается, раньше это происходит в зоне течения Соя. В летне-осенний период в варианте 1 концентрации DON на участках 1–3 одного порядка (0,01–0,03 мг N/л). Однако в зоне течения содержание DON к концу июня возрастает до 0,08 мг N/л, а затем быстро снижается до 0,035 мг N/л, что находится в прямой зависимости от условий переноса (Пищальник, Архипкин, 2000). В варианте 2 подобное повышение концентрации DON есть в августе и сентябре, соответственно, на участках 2 (до 0,17 мг N/л) и 4 (до 0,1 мг N/л). К концу года содержание DON увеличивается, причем в варианте 1 повсеместно отличия в содержании DON выше, чем в варианте 2. В заливе Анива к концу года содержание DON достигает 0,17 и 0,15 мг N/л (варианты 1 и 2 соответственно), и оно здесь выше, чем на других участках (рис. 3).

Содержание NH_4 с начала года падает. В апреле–мае оно на всех участках достигает минимума. К концу мая — началу июня с усилением активности гидробионтов в поверхностном слое отмечается общая тенденция увеличения концентрации NH_4 . Активнее процессы выражены на участках 1, 2 и 4, причем в варианте 2 этот процесс начинается на 1–2 недели раньше. Отличительной чертой годового хода NH_4 в заливе Анива является выраженный кратковременный минимум на фоне общего его летнего повышения на других участках. Максимальные летние концентрации NH_4 в варианте 1 составляют 6 (участок 1) — 10 (участки 2 и 4) мкг N/л, а в варианте 2 — на участках 1–3–4–5, и 4–7,5 мкг N/л. К концу года содержание NH_4 на всех участках снижается. Однако существенным отличием годовой динамики NH_4 в варианте 2 служит резкое возрастание в середине декабря его содержания (до 20 мкг N/л) в заливе Анива (рис. 3).

Тенденции годовой динамики NO_2 в вариантах 1 и 2, в принципе, подобны. До середины января содержание NO_2 растет (на участках 1–4 и 1–3, соответственно, в вариантах 1 и 2), а затем начинает уменьшаться. Однако в зоне течения Соя в динамике NO_2 зимой наблюдается некоторое повышение концентрации — до 2,2 и 6,3 мкг N/л в вариантах 1 и 2 соответственно. Минимальные концентрации NO_2 здесь достигаются к концу марта, а на остальной акватории — к середине апреля. Увеличение концентрации NO_2 летом является характерной особенностью сезонных их колебаний (Бруевич и др., 1960). Результаты моделирования четко показывают, что концентрации NO_2 летом увеличиваются (интенсивнее в варианте 1), а к концу года отмечается их

снижение. Однако в варианте 2 в заливе Анива отмечено резкое (как и у NH_4) возрастание концентрации NO_2 (до 7,5 мкг N/л) к середине декабря, а затем его снижение к концу года (рис. 3).

Динамика ND на участках 1 и 3 в вариантах 1 и 2 в принципе подобна. В первую половину года на участках 2 и 4 выявлена несколько большая амплитуда изменения концентрации ND в варианте 1, чем в варианте 2. В июле-августе содержание ND наименьшее и близко по концентрациям (1–3 мкг N/л), лишь на участке 2 оно в этот период увеличивается до 6 мкг N/л (вариант 2). К концу года в варианте 1 обнаружена тенденция увеличения содержания ND (до 365, 180, 160 и 70 мкг N/л на участках 1, 2, 4 и 3 соответственно). В варианте 2 повышение ND к концу года отмечено только в заливе Анива (до 400 мкг N/л) (рис. 3).

Картина внутригодового изменения концентрации NO_3 в первую половину года в вариантах 1 и 2 практически совпадает. К середине апреля содержание NO_3 на всех участках снижается, а во вторую половину года оно продолжает меняться в водной среде, однако в существенно меньшем диапазоне (рис. 5). Факт снижения в весенне-летний период концентраций NO_3 в морской среде практически до нулевых концентраций общеизвестен из-за интенсивного их потребления развивающимся фитопланктоном. Пополнение запаса NO_3 в поверхностном слое в водах Охотского моря в этот период происходит в основном за счет процессов вертикального перемешивания вод, так как развитие процессов нитрификации здесь несущественно (Бруевич и др., 1960). В диапазоне малых концентраций (<1 и $<2,5$ мкг N/л в вариантах 1 и 2 соответственно) в мае–сентябре в каждой акватории обнаруживаются существенные отличия в характере изменчивости концентраций NO_3 (в частности, по амплитудам колебаний, времени наступления и величинам отдельных пиков, характеру динамики). В период сентябрь–декабрь повсеместно характер изменчивости концентраций NO_3 практически не меняется. Расчеты по варианту 2 показывают, что содержание NO_3 с мая по декабрь на участках 1 и 3 одного порядка (низкое и маломеняющееся во времени). В районе скалы Камень Опасности оно выше, и отмечено несколько периодов повышений концентрации NO_3 (в конце июля и декабря). В зоне течения Соя содержание NO_3 выше, чем на участках 1–3, с мая отмечено повышение концентрации NO_3 до августа, а затем постепенное снижение к концу года (рис. 4).

Анализ динамики форм P в морской среде особенно важен при изучении условий формирования продуктивности водоемов (Бруевич и др., 1960), причем в этих процессах существенна роль как органических, так и минеральных компонентов P. Однако в морской среде и, в частности, в водах Охотского моря и прилегающих акваториях внутригодовая динамика соединений P исследована недостаточно. Общая тенденция внутригодового изменения концентраций растворенных компонентов P сохраняется для всех исследованных участков и свидетельствует о накоплении растворенных (органических и минеральных) компонентов зимой, их активном потреблении весной и летом, регенерации в осенний период и восстановлении запасов к концу года. В изменении содержания взвешенных компонентов P характерно увеличение концентрации после весенней активизации гидробионтов и снижение запаса в течение летнего периода; их содержание особенно подвержено влиянию процессов вертикального обмена. Все эти особенности обнаруживаются в полученной при моделировании картине внутригодового изменения концентраций P (рис. 6). Их

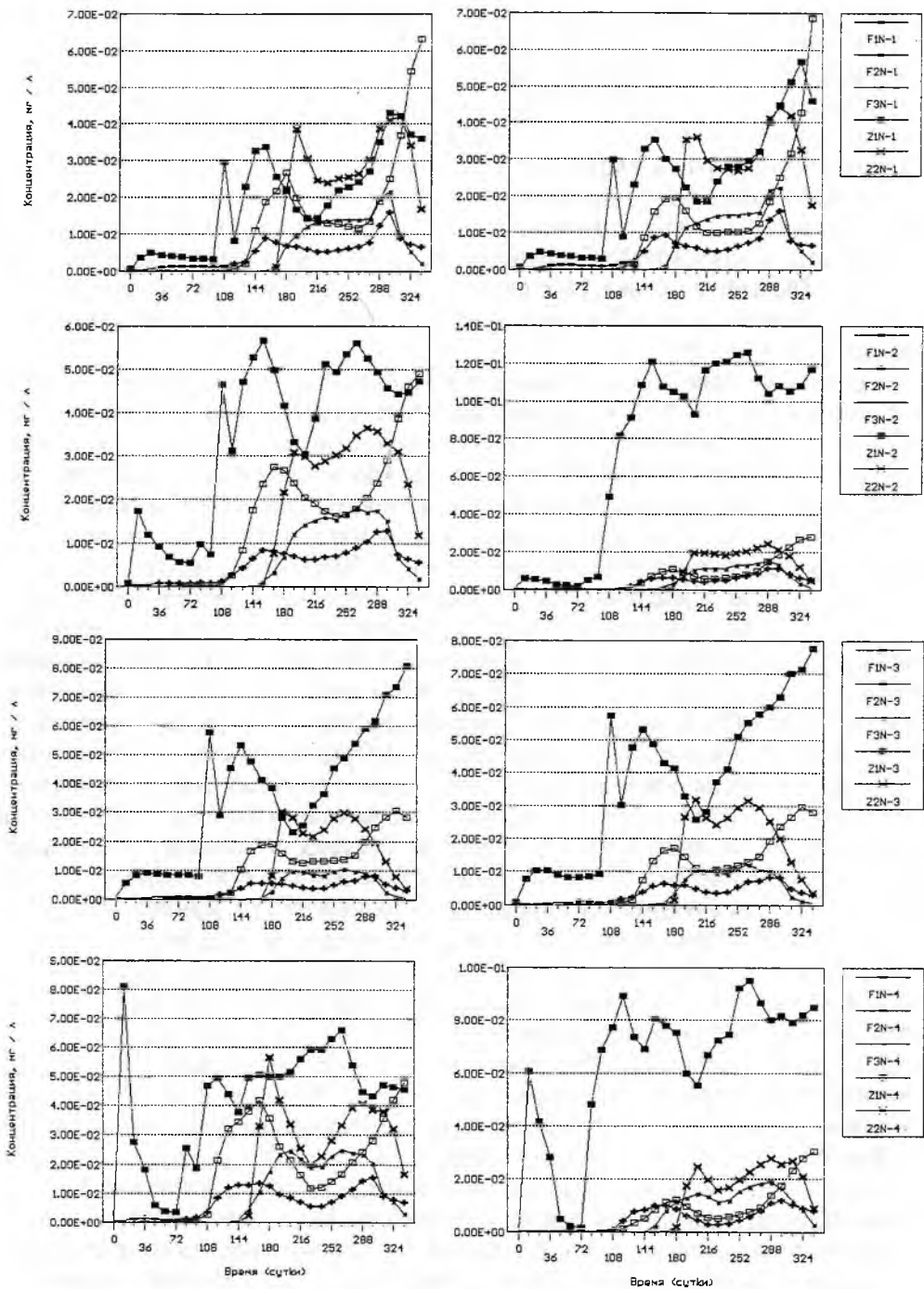


Рис. 6. Расчетная динамика внутригодовых изменений биомассы фито- (F1N, F2N и F3N) и зоопланктона (Z1N и Z2N).

анализ показывает, что годовой ход DOP в вариантах 1 и 2 подобен, отличия есть лишь в значениях концентраций DOP зимой: в варианте 1 отмечено более высокое содержание DOP в зоне течения Соя, а в варианте 2 — в районе скалы Камень Опасности, как в наиболее динамически активных районах. Как и DON, к середине июня содержание DOP на всех участках снижается, а с середины июля — конца августа возрастает, что связано с развитием продукционных процессов. К сентябрю достигается максимум концентрации DOP, причем, его величина в каждой акватории индивидуальна.

Содержание DIP повсеместно в течение года меняется с теми же особенностями, как и DOP. Некоторые отличия в концентрациях DIP обнаруживаются только в зависимости от условий переноса веществ. Содержание DIP зимой в варианте 2 в зоне течения Соя ниже и сопоставимо с содержанием в других акваториях. В июне оно на всех участках снижается, а затем начинает расти, причем, наибольший подъем концентрации DIP происходит в динамически активных зонах (в частности, и в зоне течения Соя). В варианте 1 только в заливе Анива выявлено увеличение содержания DIP к концу года. Такого резкого возрастания не отмечено в варианте 2, хотя тенденция начала роста концентрации DIP к концу года обозначена (рис. 5).

Динамика концентрации PD в вариантах 1 и 2 подобна. Во всех акваториях весной обнаруживаются промежуточные максимумы PD, вызванные активизацией развития биомасс гидробионтов. Интенсивнее образование и накопление детрита в поверхностном слое происходят в варианте 1 в динамически активных зонах, а в варианте 2 — на участках с менее активной динамикой вод. В августе—сентябре содержание PD снижается, а с октября и до конца года возрастает повсеместно. Расчеты, однако, показывают, что в варианте 2 на участке 1 к концу года достигается большее содержание PD, чем в варианте 1 (соответственно, 0,135 и 0,093 мг P/л).

В табл. 4 для сравнения приведены концентрации кислорода, фосфатов, нитритов и силикатов в верхнем слое, вычисленные по данным конкретных съемок в 2001 г., и расчетные концентрации этих веществ, оцененные для этих сроков наблюдений с помощью модели в заливе Анива (участок 1). Анализ этих данных показывает, что для указанных химических параметров отмечается вполне удовлетворительное соответствие наблюдаемых и расчетных концентраций веществ. Однако здесь надо учесть, что имеющиеся некоторые расхождения между наблюдаемыми и расчетными параметрами могут быть обусловлены отличиями в значениях факторов среды (например, температуры поверхностного слоя), оцененными в модели по среднемноголетним данным и наблюдениям 2001 г. Отметим также большой разброс концентраций растворенного кислорода и биогенных веществ (в частности, фосфатов и нитритов) для разных съемок. Расчеты показывают, что содержание фосфатов и нитритов, в целом, в течение года невелико, а в летний период снижается и находится ниже аналитически определяемых значений. Этот факт, а также большая внутригодовая изменчивость концентраций биогенных веществ по акватории залива позволяют предположить, что при изучении внутригодовых колебаний концентраций соединений биогенных элементов всю акваторию залива Анива необходимо подразделять на участки с характерными проявлениями процессов, определяющих биогенную нагрузку на водную среду. Такой подход предполагается применить на следующих этапах работ.

Биомасса и активность гидробионтов существенно меняются в водной среде.

Наблюдаемые (данные съемок СахНИРО 2001 г.) и рассчитанные по гидроэкологической модели концентрации химических параметров в верхнем слое в заливе Анива

Параметр/ размерность	Дата съемки				
	11.IV	15.VI	14.VIII	2.X	16.XI
Наблюдения					
O ₂ , мг O ₂ /л	<u>10.43–19.19</u> 13,35	<u>7.87–13.38</u> 11,63	<u>7.12–11.92</u> 8,92	<u>7.90–10.42</u> 9,23	<u>8.43–10.56</u> 9,56
DIP, мкг P/л	<u>3.1–51.8</u> 25,4	<u>0.00–65.1</u> 27,3	<u>0.00–82.8</u> 21,4	– –	<u>10.2–42.5</u> 15,8
NO ₂ , мкг N/л	<u>0.00–3.64</u> 0,14	<u>0.00–5.60</u> 0,84	<u>0.00–17.08</u> 1,54	<u>0.00–9.10</u> 0,98	– –
DISi, мкг Si/л	<u>10.90–841.7</u> 297,9	<u>21.60–502.6</u> 169,4	<u>8.40–453.6</u> 144,8	<u>19.60–1159.2</u> 138,3	<u>112.0–455.3</u> 193,2
Расчеты					
O ₂ , мг O ₂ /л	<u>13.62</u> 13,59	<u>11.88</u> 12,87	<u>10.72</u> 10,66	<u>10.60</u> 10,54	<u>12.83</u> 12,56
DIP, мкг P/л	<u>16.4</u> 17,8	<u>0.03</u> 0,07	<u>0.06</u> 0,05	<u>1.6</u> 1,6	<u>7.1</u> 0,2
NO ₂ , мкг N/л	<u>2.7</u> 2,7	<u>1.0</u> 0,02	<u>2.2</u> 0,5	<u>0.06</u> 0,06	<u>0.02</u> 1,4
DISi, мкг Si/л	<u>447.6</u> 434,3	<u>428.4</u> 378,2	<u>357.8</u> 263,9	<u>348.7</u> 311,5	<u>1001.4</u> 966,5

Наблюдения: числитель – пределы колебаний, знаменатель – средние значения. Расчеты: числитель – перенос вычислен геострофическим методом, знаменатель – по методу баланса.

Эти вариации очевидны вследствие достаточной изменчивости внутриводоемных процессов в пространственно-временных масштабах, в частности, сезонных, меж- и внутрigoдoвых, пространственных их различий как по горизонтали, так и по вертикали. На эти вариации могут влиять и многие другие факторы: доступность и обеспеченность организмов биогенными веществами и микроэлементами, трофические взаимодействия гидробионтов, перенос вещества по горизонтали и вертикали, воздействие температуры, освещенности прозрачности водной среды, особенности проявления физических процессов и т. д.

Влияние изменчивости концентраций биогенных веществ на гидробионты в морской среде изучено неполно и существенно в меньшей степени по сравнению с пресноводными системами. Между тем биохимический состав гидробионтов зависит от концентраций биогенных веществ в водной среде. Видовой состав планктонного сообщества оказывает сильное воздействие на соотношение химических элементов питательных веществ, участвующих в круговороте. Этот факт непосредственно влияет на взаимоотношения организмов и их конкуренцию за питательные вещества. Вариации в биохимическом составе источников питания могут потенциально влиять на скорость роста биомассы, а также на условия конкуренции организмов за питательные субстраты и, в целом, на взаимодействия организмов разных трофических уровней.

Расчетным картинам внутрigoдoвой изменчивости концентраций соединений N и P (рис. 3–5) соответствуют полученные данные моделирования по

биомассе планктонных организмов. Примером расчетной динамики служит рис. 6, на котором показано изменение биомасс планктонных организмов в единицах N. Как и в случае модельных расчетов для химических ингредиентов в вариантах 1 и 2 на участках 1 и 3 динамика биомасс практически идентична, что связано, в принципе, с малыми отличиями расчетных скоростей переноса через границы указанных акваторий (табл. 2 и 3). На участках 2 и 4 картины внутригодовой динамики биомасс в вариантах 1 и 2 отличаются, причем, наиболее существенно для водорослей первой группы (диатомовые): в варианте 2 во вторую половину года их биомасса в динамически активных зонах в 1,5—2 раза выше, чем в варианте 1. Картина внутригодовой изменчивости биомасс фитопланктона второй и третьей групп (соответственно, динофитовых и мелкожгутиковых водорослей) если и имеет отличия в вариантах 1 и 2, то они не столь выражены, как у диатомовых водорослей (рис. 6).

Для характеристики особенностей формирования биомасс по имеющимся в морской среде запасам биогенных веществ (соединений C, Si, N и P) были оценены значения биопродуктивности отдельных звеньев трофической цепи для участков 1—4. Расчет значений биопродуктивности выполняется в модели на каждом временном шаге на основе мгновенных значений потоков веществ. Эти значения суммируются за отдельные временные периоды (например, за каждый месяц и в целом за год). Мгновенные значения потоков вещества учитывают разнонаправленные потоки перераспределения веществ при формировании биомассы — положительные (общее потребление соединений отдельных элементов в разных формах, выделение продуктов метаболизма, отмирание, выедание организмами более высоких трофических уровней, вынос биомассы водным потоком в соседние акватории) и отрицательные (привнос биомассы водным потоком из соседних акваторий). В целом, при данном методе оценки биопродуктивности учитываются все важнейшие внутренние потоки формирования и преобразования биомассы в течение годового цикла развития гидробионтов, а также основные факторы среды обитания (температура, освещенность, прозрачность водной среды, содержание и поступление питательных веществ из разных источников) и процессы, определяющие образование, перераспределение и круговорот биогенных веществ в водной среде в рассматриваемых акваториях. Вычисленные годовые значения биопродуктивности гидробионтов в единицах N приведены в табл. 5.

Анализ табл. 5 показывает, что расчетные значения биопродуктивности в значительной степени зависят от метода оценки переноса водных масс и вещества через границы акваторий. При расчете переноса по геострофическому методу наименее продуктивным является район скалы Камень Опасности, так как в этом случае расчетные значения продукции гидробионтов в сравнении другими участками оказываются ниже (бактерий в 1,5—2 раза, фитопланктона — в 1,1—3,1 раза, зоопланктона — в 2,5—2,9 раза). Это может быть обусловлено влиянием подъема холодных вод, из-за чего формирование биомассы замедляется. При расчете переноса водных масс по методу 2 картина распределения биопродуктивности меняется на противоположную, и расчетные значения биопродуктивности на участке 2 превышают таковые для других акваторий (для бактерий в 1,9—2,8, для фитопланктона — в 1,8—7,2 раза). Однако увеличение интенсивности водообмена существенно отражается не только на условиях переноса биогенных веществ, но и на переносе биомассы, и в отдельных случаях отмечается снижение продукции звеньев трофической цепи при

Расчетные значения годовой продукции гидробионтов для верхнего слоя на участках 1—4 по результатам моделирования

Продукция	1	2	3	4
ПВ _N	<u>25,602</u> 33,539	<u>17,663</u> 92,299	<u>33,625</u> 37,813	<u>51,598</u> 48,952
ПФ1 _N	<u>3,147</u> 4,013	<u>2,819</u> 28,708	<u>8,143</u> 8,837	<u>8,242</u> 12,686
ПФ2 _N	<u>0,038</u> 0,064	<u>-0,429</u> 0,426	<u>0,030</u> 0,056	<u>0,103</u> -0,359
ПФ3 _N	<u>0,234</u> 0,266	<u>-0,394</u> 0,619	<u>0,104</u> 0,131	<u>0,500</u> -0,160
ПЗ1 _N	<u>2,365</u> 2,166	<u>1,067</u> 1,453	<u>1,609</u> 1,507	<u>3,053</u> 0,242
ПЗ2 _N	<u>2,231</u> 2,475	<u>0,803</u> 1,453	<u>1,422</u> 1,659	<u>2,765</u> 0,466
Σ ПФ _N	<u>3,419</u> 4,343	<u>1,996</u> 29,753	<u>8,277</u> 9,024	<u>8,845</u> 12,167
Σ ПЗ _N	<u>4,596</u> 4,641	<u>1,870</u> 2,906	<u>3,031</u> 3,166	<u>5,818</u> 0,708

В числителе расчет переноса геострофическим методом, в знаменателе — по методу баланса.

более интенсивном пространственном переносе водными массами химических и биологических компонентов.

Результаты моделирования показывают, что величины биомасс гидробионтов и их соотношения значительно меняются по сезонам в зависимости от метода вычисления водообмена и существенно отличаются на разных участках региона, что связано, преимущественно, с условиями поступления как биогенных веществ, так и самой биомассы между отдельными акваториями.

Соотношения значений продукции бактерий, фито- и зоопланктона, вычисленных в единицах N, составляют для разных участков 5,6—11,1:0,7—27:1 и 7,2—69,1:0,9—17,1:1, соответственно, в вариантах 1 и 2. Наименьшие соотношения характеризуют акваторию залива Анива, наибольшие — районы интенсивного переноса веществ водными массами. В суммарной годовой продукции фитопланктона вклад диатомовых на разных участках превалирует и составляет 92—99% в единицах N. Таким образом, результаты моделирования показали, что величины биопродуктивности в динамически активных районах в большей степени определяются гидрологическими условиями (среди которых на исследуемой акватории доминирует водообмен), чем внутриводоемными процессами, связанными с внутренней циркуляцией биогенных веществ.

Биогенные вещества подвергаются интенсивному преобразованию микроорганизмами. Это влияние микроорганизмов на биогенные вещества в данном случае вначале было оценено по внутригодовой динамике биомасс микроорганизмов, затем — по расчетным значениям биопродуктивности отдельных гидробионтов. Вычисленные с помощью модели значения потоков вещества можно использовать для интерпретации оцененных величин биопродуктивности сообщества организмов во взаимосвязанных участках 1—4. Скорости трансформации биогенных веществ и значения биопродукции контролируются хи-

мико-биологическими взаимодействиями и физическими процессами (в частности, процессами переноса веществ водными массами). Таким образом, расчетные значения биопродукции должны определенным образом увязываться с внутренними и внешними потоками вещества, определяемыми, соответственно, химико-биологическими взаимодействиями и показателями переноса биогенных веществ водными массами. Отметим, однако, что в данной задаче акватория залива Анива рассматривается упрощенно — единой системой, и гидродинамические процессы переноса вещества водными массами здесь аппроксимированы меньшими (в сравнении с участками 2—4) значениями расходов на границах с соседними акваториями. Важно также и то, что использованные два метода расчета переноса дают близкие значения расходов для залива Анива, а также для описания водообмена с Охотским морем на участке 3 (табл. 2—3). Динамика компонентов в заливе Анива в большей степени будет зависеть от внутренних потоков вещества, определяемых химико-биологическими взаимодействиями компонентов экосистемы. В нашей задаче наибольший интерес представляют оцененные значения потоков вещества, определяемые горизонтальным переносом водных масс для исследованных акваторий (табл. 6).

Анализ данных табл. 6 показывает, что на участках 1 и 3 итоговое поступление большинства биогенных веществ за счет горизонтального переноса веществ мало меняется при двух методах расчета расходов воды на границах акваторий. Этим могут быть объяснены сравнительно небольшие отличия в обсуждаемых ранее расчетных картинах динамики компонентов при разных способах учета переноса веществ (рис. 2—6).

Значительные отличия в итоговых величинах пространственного переноса веществ фиксируются для участков 2 и 4 (табл. 6), где существенна роль гидродинамического переноса в регулировании концентраций химико-биологических компонентов. Оцененное для участка 2 общее годовое поступление соединений N, P и DOC выше, соответственно, в 5,6—16,4, 2—3,2 и 4,8 раза в случае расчета пространственного переноса по методу баланса. Для двух компонентов (ND, DISi) отмечена смена знака в направлении потока вещества. Для участка 4 общее поступление соединений N и P при расчете переноса по методу баланса получилось выше (соответственно, в 1,7—5,9 и 1,8—2,8 раза). Смена знака направления переноса отмечена для PD и DOC. Таким образом, расчеты дают основание полагать, что в динамически активных зонах (участки 2 и 4) значительное количество химических и биологических веществ участвует в переносе, при этом роль внутренних процессов перераспределения веществ (в том числе непосредственно гидробионтов) здесь, очевидно, менее значима.

Сравнение значений потоков вещества на границах с Японским (участки 2 и 4) и Охотским (участки 3 и 4) морями показывает, что есть четкие отличия в направленности потоков и количестве вещества, переносимого водными массами на указанных границах акваторий. При расчете переноса геострофическим методом для участка 2 установлен доминирующий вынос веществ в Японское море (годовой вынос отдельных веществ выше привноса в 2—13,4 раза). Приведенные в табл. 6 данные показывают, что на участке 4 преобладает поступление большей части растворенных веществ из Японского моря (оно выше в 3,6—21,2 раза обратных потоков из этого участка в Японское море). Поступление и вынос взвешенных компонентов (ND и PD) практически сбалансированы.

Годовые потоки биогенных веществ в верхнем слое на участках 1—4, оцененные по результатам моделирования

Поток биогенных веществ	DON	ND	NH ₄	NO ₂	NO ₃	DOP	DIP	PD	DOC	DISi
	г N/м ³					г P/м ³			г C/м ³	г Si/м ³
Акватория 1										
Поступление с речным стоком	<u>0,0363</u>	<u>0,0154</u>	<u>0,0029</u>	<u>0,0001</u>	<u>0,0567</u>	<u>0,0630</u>	<u>0,0178</u>	<u>0,0016</u>	<u>0,3642</u>	<u>0,2277</u>
	0,0363	0,0154	0,0029	0,0001	0,0567	0,0630	0,0178	0,0016	0,3642	0,2277
Привнос из соседних акваторий	<u>0,2854</u>	<u>0,2011</u>	<u>0,0105</u>	<u>0,0027</u>	<u>0,0291</u>	<u>0,0993</u>	<u>0,0147</u>	<u>0,1774</u>	<u>2,9848</u>	<u>1,6638</u>
	0,4857	0,2118	0,0121	0,0021	0,0361	0,1322	0,0164	0,1810	3,8984	1,2479
Вынос в соседние акватории	<u>0,3271</u>	<u>0,2268</u>	<u>0,0136</u>	<u>0,0052</u>	<u>0,1344</u>	<u>0,0793</u>	<u>0,0270</u>	<u>0,0715</u>	<u>4,0643</u>	<u>2,1315</u>
	0,3908	0,2661	0,0114	0,0036	0,1373	0,0896	0,0235	0,0724	7,1303	1,8498
Перенос по вертикали	<u>-0,1923</u>	<u>0,3307</u>	<u>0,0197</u>	<u>0,0037</u>	<u>-0,2560</u>	<u>0,2302</u>	<u>0,0603</u>	<u>0,1087</u>	<u>-2,9991</u>	<u>3,4483</u>
	-0,2041	0,3374	0,0193	0,0039	-0,2576	0,1992	0,0548	0,1121	-3,2627	3,1243
Суммарный перенос	<u>-0,1977</u>	<u>0,3204</u>	<u>0,0240</u>	<u>0,0013</u>	<u>-0,3046</u>	<u>0,3132</u>	<u>0,0658</u>	<u>0,2162</u>	<u>-3,7144</u>	<u>3,2083</u>
	-0,0729	0,2985	0,0229	0,0025	-0,3021	0,3048	0,0655	0,2223	-6,1304	2,7501
Акватория 2										
Поступление из Японского моря	<u>3,6121</u>	<u>0,7225</u>	<u>0,1445</u>	<u>0,0145</u>	<u>0,7225</u>	<u>1,0210</u>	<u>0,1702</u>	<u>0,2042</u>	<u>17,4807</u>	<u>2,0520</u>
	34,8175	6,9636	1,3928	0,1393	6,9636	9,2354	1,5392	1,8473	163,3310	18,6805
Привнос из соседних акваторий	<u>7,2037</u>	<u>4,0274</u>	<u>0,1672</u>	<u>0,0551</u>	<u>0,8783</u>	<u>3,3156</u>	<u>0,5450</u>	<u>2,1569</u>	<u>73,1107</u>	<u>26,247</u>
	2,2746	1,4483	0,0360	0,0193	0,3798	0,7828	0,1255	0,8367	27,8988	96,4943
Вынос в Японское море	<u>8,2176</u>	<u>4,8187</u>	<u>0,1961</u>	<u>0,0732</u>	<u>1,1630</u>	<u>3,2557</u>	<u>0,5409</u>	<u>2,3961</u>	<u>69,7603</u>	<u>27,423</u>
	3,7853	1,3375	0,0959	0,0223	0,4208	1,2002	0,1736	0,6615	27,3033	46,6340
Вынос в соседние акватории	<u>0,7579</u>	<u>0,5091</u>	<u>0,0332</u>	<u>0,0094</u>	<u>0,1124</u>	<u>0,3214</u>	<u>0,0519</u>	<u>0,3497</u>	<u>8,08741</u>	<u>4,1397</u>
	16,6583	5,5938	0,4136	0,1035	2,0439	4,9118	0,7322	2,5932	15,1685	25,8535
Перенос по вертикали	<u>0,0251</u>	<u>0,3487</u>	<u>0,0156</u>	<u>0,0056</u>	<u>-0,0303</u>	<u>0,5394</u>	<u>0,1352</u>	<u>0,0922</u>	<u>-3,4905</u>	<u>3,5842</u>
	0,0641	0,2942	0,0231	0,0088	-0,0267	0,3054	0,0579	0,0617	-4,5831	2,0788
Суммарный перенос	<u>1,8654</u>	<u>-0,2292</u>	<u>0,0980</u>	<u>-0,0074</u>	<u>0,2951</u>	<u>1,2989</u>	<u>0,2576</u>	<u>-0,2925</u>	<u>9,2532</u>	<u>0,3210</u>
	16,7126	1,7748	0,9424	0,0416	4,8520	4,2116	0,8168	-0,5090	44,1749	-5,2339

Акватория 3										
Поступление из Охотского моря	<u>4,2087</u> 4,2087	<u>0,8444</u> 0,8444	<u>0,1692</u> 0,1691	<u>0,0169</u> 0,0169	<u>0,8444</u> 0,8444	<u>1,5286</u> 1,5286	<u>0,2545</u> 0,2545	<u>0,3054</u> 0,3054	<u>33,3326</u> 33,3326	<u>2,6975</u> 2,6975
Привнос из соседних акваторий	<u>0,3188</u> 0,4298	<u>0,1955</u> 0,2304	<u>0,0129</u> 0,0137	<u>0,0051</u> 0,0041	<u>0,1370</u> 0,1421	<u>0,0951</u> 0,2131	<u>0,0296</u> 0,0377	<u>0,0616</u> 0,0584	<u>3,8844</u> 6,2838	<u>1,9328</u> 1,6658
Вынос в Охотское море	<u>0,3783</u> 0,3968	<u>0,1996</u> 0,2250	<u>0,0074</u> 0,0064	<u>0,0033</u> 0,0031	<u>0,0650</u> 0,0619	<u>0,1073</u> 0,1242	<u>0,0176</u> 0,0198	<u>0,1140</u> 0,1303	<u>3,6329</u> 4,0565	<u>0,9906</u> 0,9803
Вынос в соседние акватории	<u>1,9241</u> 1,8447	<u>1,1004</u> 1,2853	<u>0,0387</u> 0,0252	<u>0,0162</u> 0,0147	<u>0,3085</u> 0,3024	<u>0,5045</u> 0,4976	<u>0,0808</u> 0,0791	<u>0,6973</u> 0,8064	<u>19,6790</u> 21,5792	<u>5,4438</u> 5,3486
Перенос по вертикали	<u>-0,0238</u> -0,0417	<u>0,3137</u> 0,3027	<u>0,0129</u> 0,148	<u>0,0032</u> 0,0038	<u>-0,0577</u> -0,0550	<u>0,4165</u> 0,3791	<u>0,1134</u> 0,1042	<u>0,0994</u> 0,0936	<u>-3,4383</u> -3,6883	<u>3,4194</u> 3,3897
Суммарный перенос	<u>2,2013</u> 2,3553	<u>0,0536</u> -0,1328	<u>0,1489</u> 0,2992	<u>0,0057</u> 0,0070	<u>0,5502</u> 0,5672	<u>1,4284</u> 1,4990	<u>0,2991</u> 0,2975	<u>-0,3449</u> -0,4793	<u>10,4668</u> 10,2924	<u>1,6153</u> 1,4241
Акватория 4										
Поступление из Японского моря	<u>1,7350</u> 11,8840	<u>0,3501</u> 2,3876	<u>0,0702</u> 0,4784	<u>0,0070</u> 0,0478	<u>0,3501</u> 2,3876	<u>0,5855</u> 4,3416	<u>0,0974</u> 0,7229	<u>0,1168</u> 0,0867	<u>14,2372</u> 99,1935	<u>0,9129</u> 7,2503
Поступление из Охотского моря	<u>2,3736</u> 15,0357	<u>0,4742</u> 3,0073	<u>0,0948</u> 0,6014	<u>0,0095</u> 0,0601	<u>0,4742</u> 3,0073	<u>1,1308</u> 8,7104	<u>0,1973</u> 1,4519	<u>0,2333</u> 1,7422	<u>0,3642</u> 15,0357	<u>2,0155</u> 13,8102
Привнос из соседних акваторий	<u>0,9870</u> 7,0150	<u>0,7375</u> 3,0197	<u>0,0212</u> 0,1563	<u>0,0075</u> 0,0457	<u>0,1319</u> 0,9208	<u>0,2104</u> 1,9734	<u>0,0325</u> 0,2977	<u>0,4702</u> 1,5751	<u>9,76475</u> 5,4272	<u>3,3467</u> 13,1982
Вынос в Японское море	<u>0,2475</u> 1,4487	<u>0,3428</u> 0,4363	<u>0,0033</u> 0,0319	<u>0,0004</u> 0,0073	<u>0,0020</u> 0,0933	<u>0,1205</u> 0,8629	<u>0,0273</u> 0,1247	<u>0,1619</u> 0,2368	<u>1,0681</u> 9,3527	<u>1,7697</u> 2,2313
Вынос в Охотское море	<u>0,2766</u> 18,4785	<u>0,2091</u> 6,5853	<u>0,0273</u> 0,4563	<u>0,0036</u> 0,0868	<u>0,0053</u> 0,9793	<u>0,3026</u> 11,5161	<u>0,0414</u> 1,5773	<u>0,1625</u> 3,8325	<u>6,4264</u> 144,7125	<u>3,6804</u> 36,7836
Вынос в соседние акватории	<u>1,2083</u> 0,0668	<u>0,7067</u> 0,0485	<u>0,0347</u> 0,0060	<u>0,0072</u> 0,0009	<u>0,0573</u> 0,0028	<u>0,8396</u> 0,2071	<u>0,1363</u> 0,0236	<u>0,4098</u> 0,0263	<u>12,493</u> 51,0392	<u>6,3771</u> 0,2479
Перенос по вертикали	<u>0,5923</u> 0,9664	<u>0,6597</u> 0,3311	<u>0,0271</u> 0,0634	<u>0,0056</u> 0,0088	<u>0,0147</u> 0,0916	<u>1,0934</u> 0,6809	<u>0,1894</u> 0,1289	<u>0,1826</u> 0,1222	<u>-6,3282</u> -9,0726	<u>2,9008</u> 3,5715
Суммарный перенос	<u>3,9555</u> 14,9071	<u>0,9629</u> 1,6756	<u>0,1480</u> 0,8053	<u>0,0184</u> 0,0674	<u>0,9063</u> 5,3319	<u>1,7574</u> 3,1199	<u>0,3116</u> 0,8758	<u>0,2687</u> -0,5694	<u>-1,9501</u> 5,4794	<u>-2,6484</u> -1,4326

В числителе – при расчете переноса геострофическим методом, в знаменателе – по методу баланса.

Расчет переноса по методу баланса меняет направления потоков переноса веществ в районе скалы Камень Опасности на противоположные. В этом случае поступление из Японского моря веществ оказывается значительным и существенно выше (в 2,8—14,5 раза) выноса веществ возвратным потоком из этого участка в Японское море. Между тем направления переноса веществ для участка 4 при расчете переноса по методу баланса не меняются: доминирует поступление веществ с водными массами из Японского моря, и оно в 3,2—25,6 раза выше, чем вынос водными массами участка 4 в Японское море. Только для PD, как и при расчете переноса геострофическим методом, есть исключение: поток из участка 4 в Японское море выше (в 2,8 раза) потока из Японского моря.

Сравнение количеств поступающих веществ на участок 2 с водными массами из Японского моря отличается при расчетах переноса по обоим методам: по балансовому методу оно выше в 9—9,6 раза. Для участка 4 это поступление для большинства компонентов выше в 6,8—7,9 раза, и лишь для PD поступление оказалось выше (в 1,3 раза) при расчете переноса геострофическим методом, чем по методу баланса. Значительное поступление биогенных веществ на участок 2 из Японского моря отмечается в августе-сентябре, а обратный перенос веществ водными массами наибольший в период март-май, что также хорошо совпадает с периодами активности течения Соя.

Анализ потоков веществ, переносимых водными массами из участка 4 в Охотское море и обратно, показывает, что метод оценки расходов воды сильно влияет на итоговую картину переноса биогенных веществ через эту границу. Так, по геострофическому методу из Охотского моря на участок 4 поступление соединений N было выше, чем вынос из участка 4, в 2,3—89,5 раза, а для соединений P — в 1,4—4,8 раза. В этих случаях наименьшие потоки были для детритных (ND и PD), а наибольшие — для минеральных (NO_3 и DIP) компонентов. Для DOC и DISi получилась обратная картина — вынос из участка 4 в Охотское море был, соответственно, выше в 17,6 и 1,8 раза в сравнении с потоками веществ из Охотского моря в эту акваторию.

При вычислении водообмена по методу баланса через границу участок 4 — Охотское море картина переноса веществ получилась неоднозначной: для DON, ND, NO_2 , DOP, DIP и PD вынос в Охотское море в 1,1—9,6 раза выше (наименьший вынос для DIP, наибольший — для DOC), чем поступление с охотоморскими водами на участок 4. Однако за год с водами Охотского моря на участок 4 минеральных компонентов NH_4 и NO_3 поступает, соответственно, в 1,3 и 3,1 раза больше, чем с обратным потоком выносятся в Охотское море.

Сравнение результатов переноса веществ водными массами показывает, что при вычислении показателей переноса с помощью метода баланса годовое поступление веществ на участок 4 с водами Охотского моря, в целом, выше для соединений N, Si, P и DOC (соответственно, в 6,3, 6,9, 7,6 и 41,3 раза), чем геострофическим методом. Поступление веществ из Охотского моря на участок 4 превалирует в период сентябрь-декабрь (падение активности течения Соя).

Соответствующее сравнение потоков веществ, выносимых в Охотское море из участка 4 и полученных при вычислении показателей переноса по методу баланса, оказалось выше для соединений N в 16,7—184,8 раза, соединений P — в 23,6—38,1 раза, DOC — в 22,5 раза и DISi — в 10 раз, чем полученных с помощью данных по переносу, оцененных геострофическим методом (табл. 6). Вынос компонентов из акватории 4 в Охотское море доминирует в период

февраль—апрель, что связано, в основном, с характером горизонтального распределения концентраций веществ.

Результаты расчетов переноса веществ, оцененного геострофическим методом, показали, что на границе участка 2 с Японским морем «чистый» перенос веществ направлен в море, а в зоне течения Соя преобладает привнос биогенных веществ из Японского моря. Со стороны Охотского моря на границе с участком 3 доминирует поступление биогенных веществ, а на участке 4 картина переноса веществ неоднозначна, зависит от характера пространственного распределения концентраций веществ, однако доминирующим является перенос в Охотское море. Согласно расчетам по методу баланса, на границах участков 2 и 4 «чистый перенос» направлен из Японского моря в пролив, на границах участка 3 с Охотским морем картина переноса не меняется, а на границе с участком 4 доминирует вынос в Охотское море.

Расчетные данные по переносу биогенных веществ позволили выявить отличия в поступлении биогенных веществ на западной границе пролива Лаперуза. Поступающие на участок 2 воды из Японского моря богаче по содержанию минеральных биогенных веществ, чем воды, поступающие на участок 4. По-видимому, воды на участке 2 обогащаются биогенными веществами за счет влияния Западно-Сахалинского течения. Это находит подтверждение в работе (Yagi et al., 1996), где воды Западно-Сахалинского течения были идентифицированы по химическим показателям в центральной части пролива Лаперуза. Однако воды течения Соя обогащены, в большей степени, содержанием органических веществ. Вместе с тем воды Восточно-Сахалинского течения, поступающие через границу с участком 3, имеют наибольшие концентрации биогенных веществ, которые являются основой формирования биопродуктивности вод залива Анива. Таким образом, в целом биопродуктивность вод в проливе Лаперуза формируется под влиянием потоков, поступающих на участок 2 из Японского моря и на участок 3 из Охотского моря. Расчеты показали, что при использовании метода баланса на участок 2 перенос биогенных веществ из Японского моря больше, чем обеспечивается водами Восточно-Сахалинского течения на участок 3. Геострофический метод дает противоположный результат.

Анализ результатов моделирования по переносу веществ водными массами на границах с Японским и Охотским морями показывает, что в целом более правдоподобная картина переноса веществ получается при оценке составляющих переноса по методу баланса. Однако этот расчетный метод дает слишком завышенные значения расходов на внешних границах исследованных акваторий, что связывается с неизбежной погрешностью методики при составлении итоговых балансов и сведении их невязки к нулю. Погрешность расчетов в этом случае определяется размерами рассматриваемых акваторий, а также сложностью гидродинамической обстановки изучаемого региона. Моделирование переноса веществ по геострофическому методу дает слишком заниженные результаты и также не годится для адекватного отображения действительности, что наглядно показано на рис. 1—6. Очевидно, что для таких сложных в гидродинамическом отношении акваторий показатели переноса должны оцениваться с помощью современных гидродинамических моделей, учитывающих более детальное описание пространственно-временных характеристик изучаемых акваторий и достаточно полные ряды гидрологических наблюдений (Ибраев и др., 2001).

Вместе с тем полученная в результате расчетов по обоим методам картина переноса веществ не противоречит основным принципам внутригодовой изменчивости биогенных веществ и удовлетворительно согласуется с современным представлением о существующей системе циркуляции вод в проливе Лаперуза и характере ее сезонной изменчивости.

ВЫВОДЫ

Анализ расчетной динамики веществ показывает, что модель, в целом, воспроизводит весь спектр закономерного внутригодового изменения концентраций органических и минеральных биогенных веществ и, в частности, соединений N и P. В зимний период в водной среде нет активного потребления биогенных веществ гидробионтами, и в поверхностном слое отмечены повышенные концентрации DON и NO₃, а также DOP и DIP. Весной, в период активизации гидробионтов, отмечены снижения концентраций органических и минеральных компонентов, в летний период за счет развития продукционных процессов возрастает пул органических веществ. В конце осеннего — начале зимнего периода содержание органических и минеральных начинает возрастать.

При заданных двух вариантах расчетов водообмена модель реалистично воспроизводит периоды интенсификации переноса веществ течениями, наблюдаемых для Восточно-Сахалинского течения в осенние месяцы, а течения Соя — в летние, что хорошо подтверждается литературными данными. Геострофический метод расчета водообмена на границе участок 2 — Японское море дает направление «чистого» переноса веществ в море, а на участке 4 показывает преобладание переноса биогенных веществ из Японского моря. На границе Охотское море — участок 3 доминирует поступление биогенных веществ, а на участке 4 картина переноса веществ неоднозначна и определяется характером пространственного распределения концентраций веществ. Перенос по методу баланса показывает, что на границах участков 2 и 4 «чистый» перенос направлен из Японского моря в пролив, на границе участок 3 — Охотское море картина переноса не меняется, а на границе с зоной течения Соя доминирует вынос в Охотское море.

Совместное использование двух инструментов исследований (электронного атласа и имитационной математической модели) позволяет существенно повысить эффективность исследования состояния морской среды и на практике реализовать возможность оперативного слежения за гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками, определяющими состояние морских биоресурсов. В дальнейших исследованиях в модель могут быть включены также химические показатели загрязнения водной среды (нефтепродукты, пестициды, тяжелые металлы), а также минеральные органогенные компоненты в осадках (Леонов, Сапожников, 1997).

Широкие пределы колебаний концентраций соединений биогенных элементов в водах залива Анива дают основание предполагать, что для изучения их внутригодового режима вся акватория залива должна подразделяться на участки с характерными индивидуальными проявлениями процессов, определяющих биогенную нагрузку на водную среду.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СахНИРО И. Ю. Брагиной, Л. Ю. Гавриной, Г. А. Кантакову, Л. Н. Пропп, В. Н. Частикову за предоставление оперативных данных по гидрологии, гидрохимии, зоопланктону и хлорофиллу для тестирования гидроэкологической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипкин В. С. Алгоритмы и программы по обработке океанологической информации. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1992. — 83 с.
2. Бруевич С. В., Богоявленский А. Н., Мокиевская В. В. Гидрохимическая характеристика Охотского моря // Тр. ИО АН. — 1960. — Т. XLII. — С. 125—198.
3. Ибраев Р. А., Саркисян А. С., Трухчев Д. И. Сезонная изменчивость циркуляции вод Каспийского моря, реконструированная по среднегодовым гидрологическим данным // Изв. Акад. Наук. Физика атмосферы и океана. — 2001. — Т. 37. — № 1. — С. 103—111.
4. Леонов А. В., Литвинов А. С., Разгулин С. М. Анализ особенностей функционирования экосистемы Рыбинского водохранилища с помощью математической модели // Вод. ресурсы. — 1996. — Т. 23. — № 6. — С. 739—753.
5. Леонов А. В., Сапожников В. В. Биогидрохимическая модель трансформации органических веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря // Компл. исслед. экосистемы Охот. моря. — М. : Изд-во ВНИРО, 1997. — С. 143—166.
6. Леонов А. В., Стыгар О. В. Математическое моделирование процессов биотрансформации органических веществ для изучения условий эвтрофирования вод поверхностного слоя Каспийского моря // Вод. ресурсы. — 2001. — Т. 28. — № 5. — С. 587—605.
7. Леонов А. К. Региональная океанография. — Л. : Гидрометеиздат, 1960. — Ч. 1. — 776 с.
8. Назаров Н. А., Леонов А. В. Моделирование водного и биогеохимического циклов лесного бассейна в течение года // Вод. ресурсы. — 1999. — Т. 26. — № 1. — С. 35—47.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. — Л. : Гидрометеиздат, 1990. — Сер. 3. — Ч. 1—6. — Вып. 34. Сах. обл. — 350 с.
10. Пищальник В. М., Бобков А. О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. — Ю-Сах. : Изд-во СахГУ, 2000а. — Ч. I. — 174 с.
11. Пищальник В. М., Бобков А. О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. — Ю-Сах. : Изд-во СахГУ, 2000б. — Ч. II. — 108 с.
12. Пищальник В. М. Опыт создания компьютеризированного атласа сахалинского шельфа // Компл. исслед. экосистемы Охот. моря. — М. : Изд-во ВНИРО, 1997. — С. 67—78.
13. Пищальник В. М., Архипкин В. С. Сезонная изменчивость термохалинной структуры вод в проливе Лаперуза // Вестн. МГУ, сер. 5 «География». — 2000. — № 5. — С. 43—47.
14. Пищальник В. М., Архипкин В. С. Сезонные вариации циркуляции вод на охотоморском шельфе острова Сахалин // Тем. вып. ДВНИГМИ. — Владивосток : Дальнаука, 1999. — № 2. — С. 84—96.
15. Поезжалова О. С., Шевченко Г. В. Вариации среднего уровня Охотского моря // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. — Ю-Сах. : ИМГиГ ДВО РАН, 1997. — Т. VIII. Цунами и сопутствующие явления. — С. 131—141.
16. Радзиховская М. А. Водный и тепловой баланс Японского моря // Осн. черты геологии и гидрологии Япон. моря. — М. : Изд-во АН СССР, 1961. — С. 20—31.
17. Супранович Т. И., Юрасов Г. И., Кантаков Г. А. Непериодические течения и водообмен в проливе Лаперуза // Метеорология и гидрология. — 2001. — № 3. — С. 80—84.
18. Aota Masaaki, Takidzawa Takatosi Soya Project // Marine Science Monthly (Japan). — 1994. — Vol. 26. — No. 12. — P. 819—823.
19. Conkright M. E., Levitus S., Boyer T. P. NOAA Atlas NESDIS 1. World Ocean Atlas 1994. — Washington DC : US Department of Commerce, 1994. — Vol. 1. Nutrients. — 150 p.
20. Yagi H., Tanaka I., Kantakov G., Samatov A., Nakata A., Watanabe T. Oceanographic observations of Cold Water Belt in summer in the Soya Straits and adjacent sea areas and its origin estimated from nutrient, DO and T-S analyses. International Workshop on the Okhotsk Sea and Arctic, the Physics and Biogeochemistry implied to the Global Cycles. Proceedings. 29 February — 1 March 1996. — Tokyo, Japan, JAMSTEC. — 1996. — P. 58—62.

Пищальник В. М., Леонов А. В. Опыт совместного применения электронного океанографического атласа и имитационной математической модели для исследования процессов биотрансформации органических веществ в проливе Лаперуза // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. — Ю-Сах. : СахНИРО, 2002. — Т. 4. — С. 22—47.

Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин и математическая модель трансформации соединений биогенных элементов (N, P, Si, C) были применены для изучения особенностей биотрансформации и переноса органических и минеральных компонентов указанных элементов на акватории пролива Лаперуза, подразделенной на 4 района, отличающихся условиями гидродинамического переноса. В данном исследовании перенос рассчитывался двумя методами: 1) в геострофическом приближении и 2) методом баланса, учитывающего инструментальные наблюдения за скоростями течений, колебаниями уровня моря и внутригодовыми изменениями объемов водных масс. Сравняются полученные картины динамики соединений органических элементов, сезонная динамика увязывается с данными моделирования по внутренним и внешним потокам указанных элементов. Оценена интенсивность переноса химических компонентов и биомассы через внутренние и внешние границы акваторий (в частности, с Японским и Охотским морями).

Табл. — 6, ил. — 6, библиогр. — 20.

Pishalnik V. M., Leonov A. V. The experience of joint use of electronic oceanographic atlas and simulation mathematical model for investigations of biotransformation process of organogenic substances in La Perouse Strait // Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. — Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2002. — Vol. 4. — P. 22—47.

Oceanographic atlas of Sakhalin Island shelf zone and mathematical model of transformation biogenic elements conjunction (N, P, Si, C) were applied for research of biotransformation peculiarities and transport of organic and mineral components of indicated elements in waters of La Perouse Strait, that were divided into 4 areas, differing in hydrodynamic transport conditions. In this survey the transport was calculated via 2 methods: 1) by geostrophic approximation and 2) by balance method, taking into account instrumental observations for currents speed, sea level oscillations and annual variation of water mass volume. Obtained situation of dynamics combination of organogenic elements was compared, seasonal dynamics was coordinated with modeling data of external and inner currents of indicated elements. There was estimated transport intensity of chemical components and biomasses through external and inner boundaries of water masses (specifically the Okhotsk and the Japanese Sea).

Tabl. — 6, fig. — 6, ref. — 20.