

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО ЗАРАЖЕНИЯ В ВОДОЕМАХ

Работа посвящена рассмотрению возможностей исследования гидрофизического и биогеохимического режимов меромиктического водоема на основе использования объединенных биогеохимической модели ОхуДер и трехмерной гидродинамической модели GETM на примере фьорда Хуннбунн и системы Шатурских озер-охладителей. Основной целью работы была параметризация процессов кислородного истощения, приводящих к формированию субоксильных и анаэробных условий в водной толще. Модель ОхуДер учитывает 5 основных переменных: растворенный кислород, неорганические биогены, растворенное органическое вещество, взвешенное органическое вещество, биота и описывает основные процессы, ответственные за изменение кислородных условий в водной толще, т.е. синтез органического вещества (ОВ); разложение ОВ в процессе кислородного окисления или денитрификации; потребление кислорода на окисление металлов (Fe и Mn) и серы; и граничные процессы (обмен на границе «воздух-вода» и обмен между водой и донными отложениями). Результаты численных экспериментов воспроизвели особенности наблюдаемой структуры водоема и позволили обнаружить основные факторы, определяющие формирование биогеохимической структуры меромиктических водных объектов. Анализ результатов численных экспериментов и сравнение с данными наблюдений показали, что упрощенная биогеохимическая модель может быть использована как эффективный инструмент для исследования и прогноза изменений кислородного и биогенного режимов.

Введение

Кислородное истощение и формирование анаэробных условий – явление, наблюдаемое во многих внутренних водоемах и прибрежных зонах морей и океанов. Такие условия появляются, когда потоки органического вещества (ОВ) и кислорода в более глубокие горизонты не сбалансированы, и весь кислород используется в процессе разложения ОВ. Разложение ОВ в этом случае продолжается путем денитрификации (потребление окисленных форм азота - нитрата NO_3 , нитрита NO_2) и, в конечном итоге, через восстановление сульфатов. Основываясь на современных оценках [1] количество и площади мертвых зон с низким содержанием кислорода увеличивались экспоненциально с 1960-го года. Образование кислородной недостаточности, гипоксильных и анаэробных условий зависит от сочетания влияния эвтрофикации (количества накопленного питательного вещества) и интенсивностей перемешивания и обновления воды.

Естественная структура таких комплексных систем со сменяющимися окислительно-восстановительными условиями может быть эффективно проанализирована с помощью математических моделей. Проблема разработки биогеохимического блока для различных окислительно-восстановительных условий связана с необходимостью параметризации перехода от процессов, доминирующих в кислородных условиях (т.е. нитрификация), к гипоксильным условиям (денитрификация) и к субоксильным условиям (потеря кислорода на минерализацию восстановленных форм серы и металлов).

Порог перехода от аэробных к гипоксильным условиям произвольно установлен у граничного значения в $2 \text{ мгO}_2/\text{л}$ ($\sim 63 \text{ мкмольO}_2/\text{л}$). Эта оценка может быть связана с уязвимостью фауны пелагиали и бентоса и ее реакцией. Обычно эти граничные значения находятся в рамках $1\text{-}4 \text{ мгO}_2/\text{л}$ [2]. Порог между

гипоксильными и субоксильными условиями (около 10-30 мкмоль O₂/л [3]) должен отражать содержание кислорода, при котором O становится вспомогательным окислителем по сравнению с нитратами и окисленными формами металлов (Fe и Mn).

Целью данного исследования была разработка упрощенной биогеохимической модели для исследования динамики кислородного режима и применение её к конкретному объекту. Эта модель должна параметризовать изменения в биогеохимических процессах в случае изменения концентрации кислорода с аэробного до субоксильного уровня. Мы использовали объединенную OxyDep/GETM модель для вычисления сезонного разнообразия меромиктического фьорда Хуннбунн и Шатурских озер-охладителей.

Гидрофизическая и гидрохимическая структура фьорда Хуннбунн

Фьорд Хуннбунн (рис. 1) – естественный меромиктический водный объект с высоки-

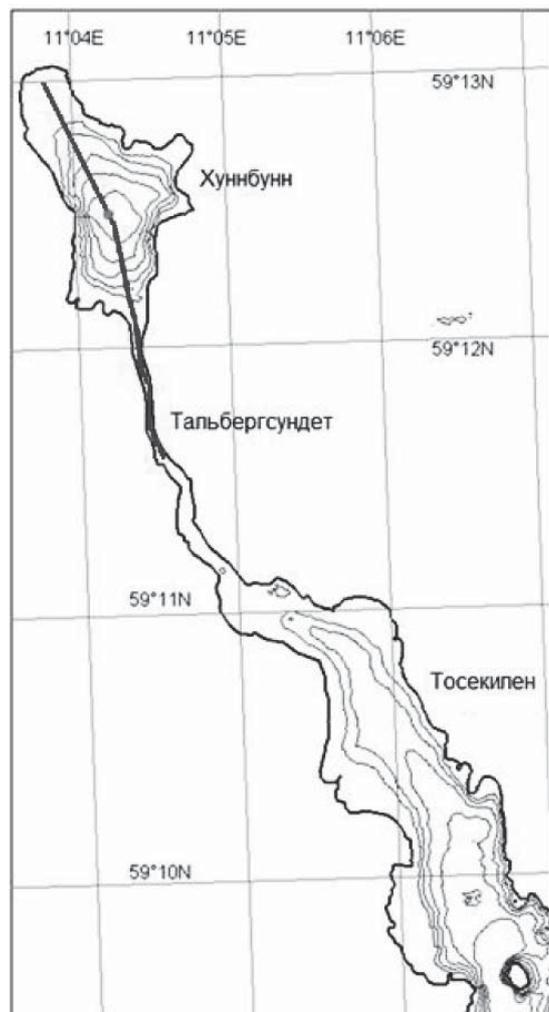


Рис. 1. Карта фьорда Хуннбунн. Сечение рельефа составляет 2 м. Точка гидрохимических наблюдений отмечена красным.

Г.А. Саминский*,
аспирант,
Учреждение
Российской академии
наук Институт водных
проблем РАН
(ИВП РАН)

Е.И. Дебольская,
доктор технических
наук, ведущий науч-
ный сотрудник,
Учреждение
Российской академии
наук Институт водных
проблем РАН
(ИВП РАН)

И.С. Кузнецов,
кандидат физико-
математических наук,
Swedish
Meteorological and
Hydrological Institute
(SMHI)

Е.В. Якушев,
доктор физико-
математических наук,
Norsk institutt for
vannforskning, (NIVA)

ми концентрациями сероводорода в глубоких слоях. Плотностная стратификация изменяется во фьорде не только из-за метеорологических факторов, но и вместе с сезонными флуктуациями солености воды, протекающей через канал [4, 5]. Период приливной волны равняется 12 час, амплитуда уровня у входа в озеро составляет 0,5 м. Соленость на входе в фьорд изменяется от 27 % зимой до 7 % во время весеннего половодья.

Стратификация этого озера-фьорда обусловлена сильным галоклином. Ветер и приливо-отливные волны, приходящие с моря через узкий канал Тальбергсундет (длиной 1,8 км), перемешивают верхние 2 м менее соленой воды, тогда как более соленый придонный слой остается не перемешанным. Максимальная глубина фьорда составляет около 11 м [4, 5].

Между тем, из предыдущих исследований фьорда Хуннбунн известно, что в прошлом кислородные условия во фьорде были гораздо лучше. Из литературы, посвященной наблюдениям, проведенным во фьорде, известно, что в XIX веке в водоеме водились устрицы (Клавестад, 1957, цит. по [4]). Период интенсивной эвтрофикации и отсутствие периодических дноуглубительных работ после 1950-го года привели к изменению экосистемы приповерхностной толщи воды: исчезновению устриц, уменьшению донной растительности, появлению большого количества зелёных водорослей.

Современная вертикальная гидрохимическая структура во фьорде Хуннбунн (рис. 2) типична для прибрежных морских объектов с анаэробными условиями в водной толще. Данные измерений, приведенные на рис. 2, были получены в совместной норвежско-российской экспедиции в 2009 г. Анализы были сделаны в химической лаборатории Норвежского института водных исследований (NIVA). Для измерения локальных концентраций кислорода был использован оксиметр AAPI OxygenOptode.

ОВ, продуцируемое во фьорде Хуннбунн, ускоряет истощение кислорода и продуцирование сероводорода, что приводит к положительной обратной связи и, в дальнейшем, увеличению потока питательных веществ к эвтрофной зоне.

Анаэробный слой фьорда Хуннбунн может быть промыт богатой кислородом холодной водой во время зимнего перемешивания, происходящего ежегодно (как в заливе Елевсис в Средиземном море [6]), или каж-

* Адрес для корреспонденции: grishasam@yandex.ru

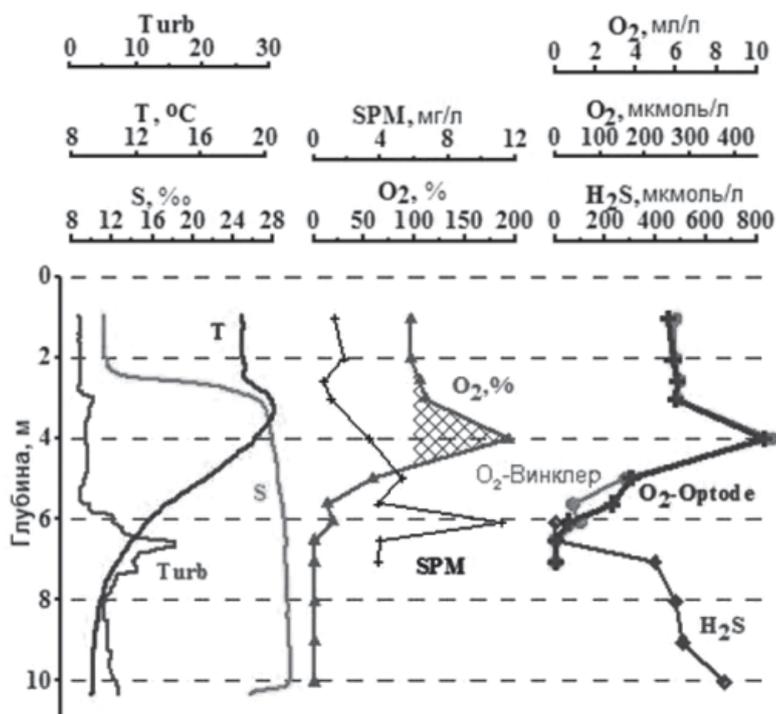


Рис. 2. Вертикальная гидрохимическая структура фьорда Хуннбунн 19.08.2009 г.

T – температура, S – соленость, Turb – мутность, $O_2\%$ – относительное содержание кислорода, SPM – количество взвешенного вещества, O_2 -Винклер – содержание кислорода, определенное по методу Винклера, O_2 -Optode – содержание кислорода, определенное по оксиметру AANDERAA Optode, H_2S – содержание сероводорода.

дые несколько лет (как в Осло фьорде [7]), или каждые несколько деkad (как во фьорде Фрамварен [8]).

Возможность зимнего перемешивания зависит от топографии, гидрофизического режима и климата (погодных условий в течение зимы). Постоянный скачок плотности, который существует во фьорде Хуннбунн на глубине 2,5-3 м, сильно затрудняет «промывку» придонных вод.

Шатурские озера-охладители

К северу от г. Шатура расположились озера Шатурской озерной группы, состоящей из более десяти озер. Озера этой группы имеют общую площадь более 16 км². Наиболее крупными являются Шатурские озера, расположенные на водоразделе рек Ушма и Поля.

Шатурские озера служат водоемами-охладителями Шатурской ГРЭС. Это озера Святое, Муромское, Белое, Черное, связанные между собой искусственными каналами.

Тепловая станция расположена между Муромским и Черными озерами. Станция забирает воду в оз. Черное и сбрасывает нагретую воду в Муромское озеро. Система охлаждения замыкается следующим обра-

зом: теплые воды, сбрасываемые в оз. Муромское, поступают по каналам в оз. Белое, откуда далее воды следуют в оз. Святое, распределяясь по его площади посредством системы струнаправляющих дамб, сооруженных для увеличения времени охлаждения (рис. 3), и далее попадают в оз. Черное, из которого производится забор воды.

Оз. Черное – наименьшее из озер-охладителей. Площадь зеркала 0,22 км². Оз. Муромское – второе по величине Шатурское озеро. Площадь 2,64 км², наибольшая глубина 2 м. Из-за сброса с электростанции вода в озере теплая в течение всего года. На севере озеро соединено двумя протоками с оз. Белое. Оно соединяется на юге с оз. Муромское, на северо-западе – с оз. Святое. Площадь 0,16 км², средняя глубина 2,5 м, максимальная 7 м. Оз. Святое – одно из самых больших по площади озер Подмосковья. Площадь водоема составляет приблизительно 11,6 км². Средняя глубина озера около 3 м, максимальная – до 8 м за счет искусственных выемок.

Измерения, проведенные в ИВП РАН в 2008 г., показали, что распределение глубин в большинстве озер имеет достаточно сложный характер. На акваториях озер имеются ложбины и гребни, осложняющие циркуляцию вод в озерах с образованием застойных зон. Наибольшая скорость течений наблюдалась в каналах и протоках, соединяющих озера, а также в прорезях в дамбе, разделяющей оз. Святое. После дамб струйный поток быстро рассеивается, скорости потока резко снижаются. Направление их также становится нестабильным, формирования единой струи, связывающей систему Шатурских озер, не происходит. Дальнейшее движение воды

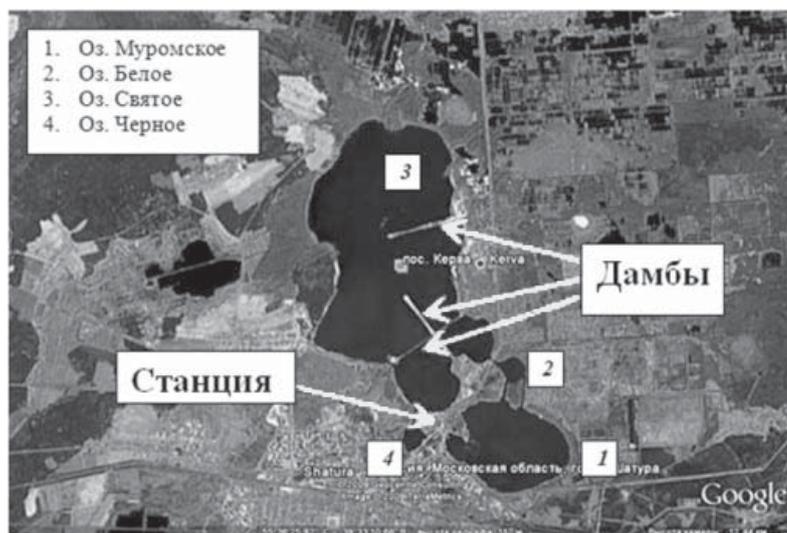


Рис. 3. Система Шатурских озер <http://maps.google.com>.

происходит, главным образом, под воздействием ветра. Скорости течения могут достигать 0,34 м/с в протоке, соединяющей оз. Святое и оз. Черное.

Температурный режим Шатурской группы озер определяется метеорологическими условиями и тепловым потоком, создаваемым выпусками воды с ГРЭС. Характерной особенностью термического режима озер является частое превышение температуры воды над температурой воздуха, особенно в первых озерах технологического цикла охлаждения воды. Рельеф дна в оз. Муромское приводит к созданию локальных участков (углублений), не вовлеченных в общий процесс рассеяния тепловой энергии (охлаждения воды). В оз. Святое происходит отклонение потока теплой воды к востоку, что вызывает, с одной стороны, удлинение пути и, соответственно, увеличение времени охлаждения, с другой стороны, приводит к перегреву локального участка восточного побережья озера, его активному зарастанию и возникновению субокисных и заморных явлений.

Описание применяемых моделей

Гидродинамическая модель GETM

Для моделирования гидродинамического и термического режима использовалась модель General Estuarine Transport Model (GETM) (<http://www.getm.eu>) - трехмерная численная модель для описания наиболее важных термодинамических и гидродинамических процессов в природных водах. GETM может быть применена к различным системам, масштабам и условиям. Модель позволяет учитывать, например, затопление и осушение приливного мелководья, использовать гибкие вертикальные и горизонталь-

ные системы координат, различные модели турбулентности и биогеохимические модели. Модель GETM к настоящему времени была успешно применена для многих водных объектов (морей, лагун, озер, устьевых участков рек, эстуариев). Особая ценность при моделировании внутренних водоемов заключается в возможности использования модели для расчетов в условиях «мелкой воды», учета стратификации различного происхождения, сложной топографии дна и берегов, задании сложного метеорологического и антропогенного форсинга.

Гидродинамика в GETM описывается гидростатическими уравнениями движения в приближении Буссинеска. В термодинамическом блоке модели рассчитываются трехмерные распределения температуры воды в водоеме на основе адвекционно-диффузионного уравнения с учетом испарения с водной поверхности за счет коротковолновой радиации.

Для расчета турбулентных характеристик была выбрана к-ε модель турбулентности.

Основным уравнением, объединяющим гидродинамический и биогеохимический блоки модели служило уравнение трансформации и переноса примеси:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + C\bar{V} - (K C) = R_{Ci} - \frac{\partial}{\partial z}(w_c C_i)$$

где первый член в левой части уравнения отражает изменение во времени, второй член описывает адвективный перенос, а третий ответственен за турбулентный обмен, R_{Ci} – описывает источники и стоки для рассматриваемых биогеохимических элементов, C – концентрация i -й переменной и w_c – скорость осаждения нерастворенного вещества.



Переменная	Значение	Единица измерения
BIO	Вся биота от бактерий до рыб. BIO увеличивается в процессе фотосинтеза, теряет неорганическое вещество в процессе дыхания и теряет общее (растворенное и взвешенное) органическое вещество в процессах метаболизма, отмирания, каннибализма и т.д.	мкмоль-N/л
NUT	Кислород содержащие формы биогенов (т.е. NO_3 и NO_2 для N), которые не требуют дополнительного кислорода для нитрификации	мкмоль-N/л
POM	Все типы лабильного (нерастворенного) органического вещества (детрита)	мкмоль-N/л
DOM	Все типы лабильного растворенного органического вещества и восстановленных форм неорганических биогенов	мкмоль-N/л
OXY	Концентрация растворенного кислорода	мкмоль- O_2 /л

Биогеохимический блок OxyDep .

Основная идея OxyDep состоит в том, чтобы наиболее простым способом параметризовать изменения биогеохимических процессов в водной толще и на границе «вода – донные отложения» в случае перехода от аэробных к субоксильным условиям и от субоксильных к анаэробным условиям. Цель разработки такой модели состояла в получении простого инструмента, который можно соединять с подробными трехмерными моделями (например, GETM [9], ROMS [10], HAMSOМ/ECOSMO [11]), в первую очередь для применения в мелкой воде - в эстуариях, озерах и фьордах.

Количество переменных (C_i) и процессов, включенных в параметризацию, должно зависеть от временных масштабов различных процессов и концентраций. В случае изучения поведения параметров с большими масштабами концентрации (таких как кислород и неорганические биогены с величина-

ми концентрации 10^1 - 10^2 мкмоль/л) на сравнительно большом временном масштабе (сезонном) возможно описывать биологические переменные одним параметром (с характерными концентрациями менее 10^{-2} - 10^{-1} мкмоль/л). Список переменных (C_i) этой модели представлен в *табл. 1*.

Схема биогеохимических процессов, рассмотренных в OxyDep, показана на *рис. 4*. Биогеохимические изменения рассматриваемых переменных, R_c , их параметризация и граничные условия описаны в [12].

Результаты и их обсуждение

Фьорд Хуннбунн

Расчетная сетка для фьорда Хуннбунн состояла из $90 \times 47 \times 10$ точек при горизонтальном разрешении 50×50 м и 10 вертикальных разрезов. Шаг вертикальной сигма-координатной сетки менялся от 20 см до 1 м. Временной шаг счета 2 сек.

При моделировании учитывалось атмосферное влияние (сезонные и суточные изменения температуры и ветра), а также изменения температуры, солености и уровня водной поверхности на боковых границах.

Приток пресной воды не включался в модель, так как значительных источников поступления пресной воды в Хуннбунн нет.

Результаты моделирования структуры фьорда Хуннбунн в летний период вдоль разреза, позиционирующегося от устья канала до самой отдаленной от устья точки, (*рис. 1, зеленая линия*) показаны на *рис. 5*.

По данным наблюдений [4] весеннее установление развитого пикноклина и его последующее размывание в августе является наиболее примечательной особенностью гидрологического режима Хуннбунн.

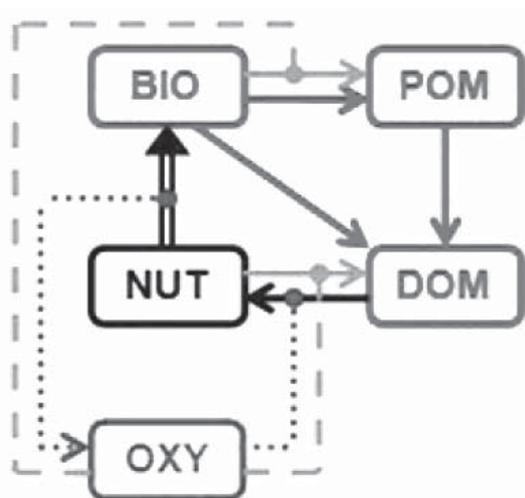


Рис. 4. Схема биогеохимических процессов в модели OxyDep.

При расчетах гидродинамической структуры необходимо было достичь стабильности скачка плотности в течение времени, достаточного для формирования бескислородного слоя.

Разработанная модель была способна воспроизвести формирование скачка плотности, но он был не стабилен и разрушался вскоре после формирования. Численные эксперименты с различным вертикальным разрешением слоев модели (с уменьшением расстояния между слоями под верхней поверхностью воды и его увеличением над дном и наоборот) всегда показывало разрушение плотностного скачка из-за интенсивного перемешивания вдоль склонов.

Рассчитанная летняя гидрофизическая структура (рис. 5) характеризовалась постепенным уменьшением температуры от 15,3 °С у поверхности до 15,0 °С у дна, в то время как соленость увеличивалась от 14,0‰ у поверхности до 15,0‰ у дна.

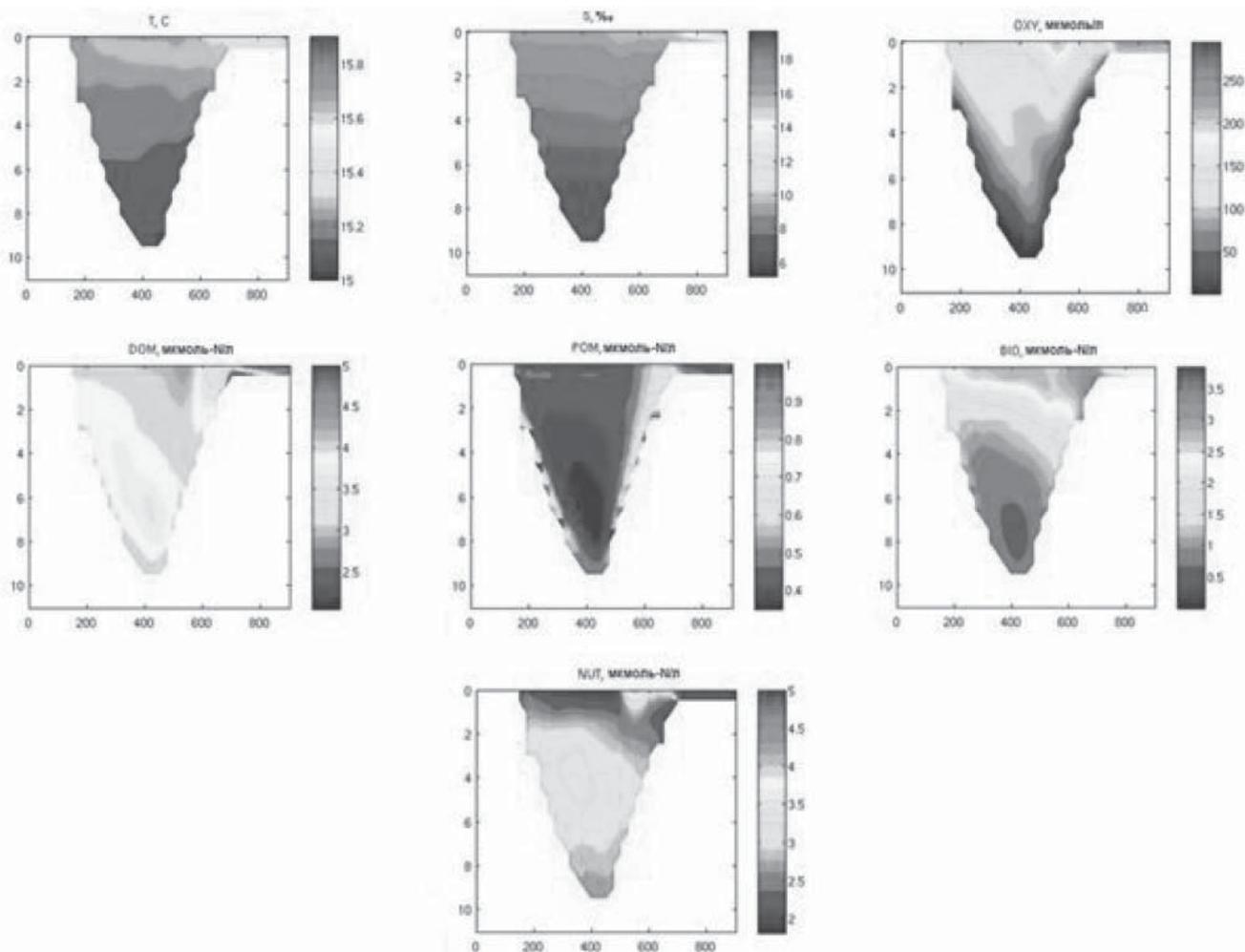
Ключевые слова:

моделирование,
стратифицированный
бассейн,
гипоксия,
анаэробные условия

С такой гидрофизической структурой модель позволяла имитировать основные особенности вертикальной биогеохимической структуры водного объекта с придонной анаэробной зоной. Использование ВЮ-блока модели позволяло параметризовать процессы синтеза ОВ, которые приводили к высоким концентрациям DOM (растворенное ОВ) и POM (взвешенное ОВ). Максимум концентрации ВЮ (биоты) наблюдается в верхних 0-2 м водной толщи и составил 3,5 мкмоль-N/л (около 50 мг-Chl-a/л) и уменьшается до 0 ниже 6 м глубины. Концентрации DOM изменялись от 5 мкмоль/л в эфотическом слое до примерно 3 мкмоль/л на глубине 4-8 м, и увеличивались до 4-4,5 мкмоль/л у дна. Максимальная концентрация POM обнаружена прямо на дне. Придонный водный слой около устья канала был более насыщен биотой и органическими соединениями, чем потоки на противоположном склоне.

Кислородный режим определялся тремя факторами: (1) продукцией и потреблением вследствие фотосинтеза и разложения ОВ, (2) обменом с атмосферой, (3) обменом с дном. O₂ характеризуется максимальными концентрациями (200-280 мкмоль/л) в поверхностном 0-2 метровом слое, где проис-

Рис. 5. Результаты моделирования вертикальной структуры фьорда Хуннбунн по линии от устья канала, до наиболее удаленной от него точки в летний период. Результаты моделирования температуры, солености, кислорода, DOM, POM, ВЮ и NUT.



ходит фотосинтез. Газообмен поддерживает высокие концентрации кислорода в поверхностном слое. Под этим слоем кислород расходуется на разложение ОВ (в первую очередь растворенных форм, DOM). Осаждение РОМ и ВЮ приводило к обогащению придонного слоя ОВ. Здесь растворенный кислород быстро исчерпывался на окисление РОМ и DOM из водной толщи, донного РОМ, обеспечивая поток DOM и восстановленных форм серы и металлов из осадка. Это способствовало воспроизводству анаэробных условий прямо в дне и субокисильных условий в 1-2 метровом слое над ложем водоема. Концентрации NUT (нитраты и нитриты) увеличивались от примерно 2 мкмоль-N/л в верхнем водном слое до 3,5-4 мкмоль-N/л на глубине 4-6 м и уменьшались далее ко дну вследствие денитрификации.

Модель не смогла симитировать 5-метровый бескислородный слой в современном фьорде Хуннбунн, но адекватно воспроизвела характерные особенности вертикальной биогеохимической структуры с бескислородными условиями у дна. Концентрации кислорода, соответствующие субокисильным условиям (менее 30 мкмоль/л), наблюдались в глубокой части моделируемого водоема в 2-метровом придонном слое. Можно предположить, что похожая структура была во фьорде Хуннбунн и ранее, когда кислородные условия были лучше [4].

Основная причина отличия между результатами моделирования и данными наблюдений в том, что гидрофизический блок модели не смог смоделировать формирование постоянно развитого пикноклина (галоклина), который препятствует вертикальному обмену между верхними и нижними водными слоя-

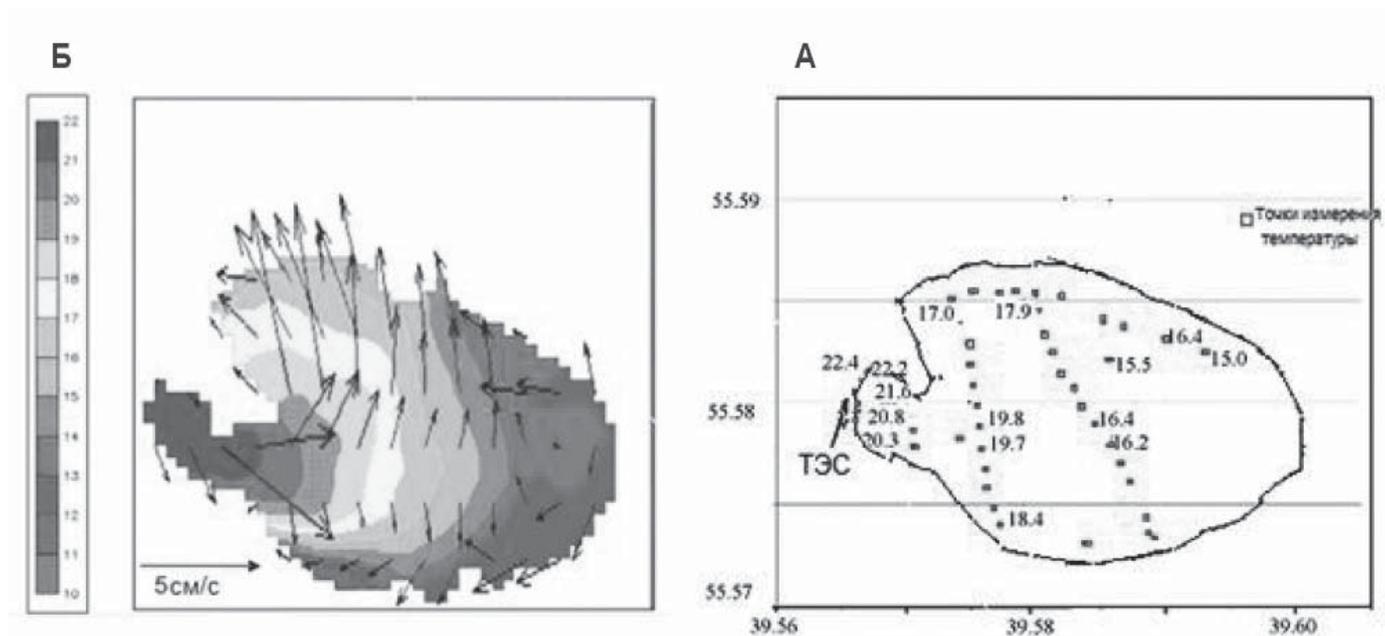
ми. Можно предположить, что использование модели с вертикальными сигма-координатами (такой, как GETM) затрудняет получение гидрофизической структуры мелких водоемов с выраженным пикноклином, таких как фьорд Хуннбунн. Необходимость равного количества вертикальных слоев для каждой точки горизонтальной сетки в моделях, использующих сигма-координаты, приводит к значительным изменениям физического вертикального разрешения (от 1 до 0,2 м в данной модели). На склонах водного объекта усиленный обмен вдоль сигма-поверхностей приводит к увеличению вертикального переноса тепла и соли, что не соответствует происходящему в природе.

Шатурские озера

Для расчета гидротермического и биогеохимического режима Шатурских озер-охладителей был использован упрощенный 4-компонентный вариант биогеохимической модели OXYDER, содержащий 4 переменных состояния: ВЮ, NUT, ОХУ и ОВ, то есть все виды лабильного ОВ (взвешенного и растворенного).

Численные эксперименты позволили воспроизвести изменчивость термического и биогеохимического режима системы озер в естественных условиях и при дополнительном антропогенном воздействии, вызывающем тепловое загрязнение. Чтобы получить сбалансированные начальные условия были проведены расчеты теплового режима без тепловой нагрузки в течение двух лет.

Рис. 6. Результаты измерений и расчетов по модели температуры поверхности после 4-часового сброса теплой воды.



Калибровка модели строилась на сравнении с данными измерений температуры воды и скорости течений, проведенных в период лета и зимы 2008 г., и показала, что данные, полученные в результате расчетов по модели, хорошо соответствовали данным измерений для большинства параметров. Результаты измерений температуры поверхности и скорости течений после 4-часового сброса теплой воды показаны на *рис. 6А*. Результаты моделирования при тех же метеорологических условиях, показаны на *рис. 6Б*. Вертикальное распределение температуры и скорости потока, рассчитанное по модели также совпало с данными измерений.

Чтобы определить влияние теплового загрязнения был смоделирован сброс разогретой воды объемом 20 м³/с и перепадом температур в 8 °С между водозабором и водосбросом с электростанции.

Моделирование динамики биогеохимических параметров для естественного режима (т.е. с отсутствием теплового сброса) воспроизвело разумные изменения их концентраций. *Рис. 7-10* показывают динамику биогеохимических параметров поверхностного слоя в центре озера.

Растворенный кислород характеризуется значительной сезонной изменчивостью с максимальными значениями весной (более 400 мкмоль/л) и минимальным в конце лета (250 мкмоль/л). Изменчивость кислорода (*рис. 7*) в основном вызвана температурной зависимостью обмена с атмосферой, в то время как процессы синтеза и распада ОВ привели к дополнительному увеличению их концентраций в июне (по сравнению с годовым максимальным значением 430 мкмоль/л) и снижению в конце августа. Начавшийся в мае рост биоты привёл к резкому снижению неорганических биогенов от 15 мкмоль/л до 2,5 мкмоль/л (*рис. 8, 9*). Рост биоты останавливается в июне, когда концентрация неорганических биогенов падает до предельных значений, и возобновляется снова в августе. В сентябре синтез ОВ становится невозможным из-за недостаточного освещения и низкой температуры. Такое развитие экосистемы, с наличием 2 (или несколько) цветений водорослей характерно для умеренных широт и может быть легко воспроизведено в экологических моделях. Изменчивость ОВ (детрита и растворенного) в целом соответствует изменчивости биоты и также воспроизводит два пика (*рис. 10*), которые становятся более сглаженными, так как разложение ОВ - это более медленный процесс, чем умирание организмов. Под влиянием теплового воздействия (*рис. 7-10*) цветение биоты началось на месяц

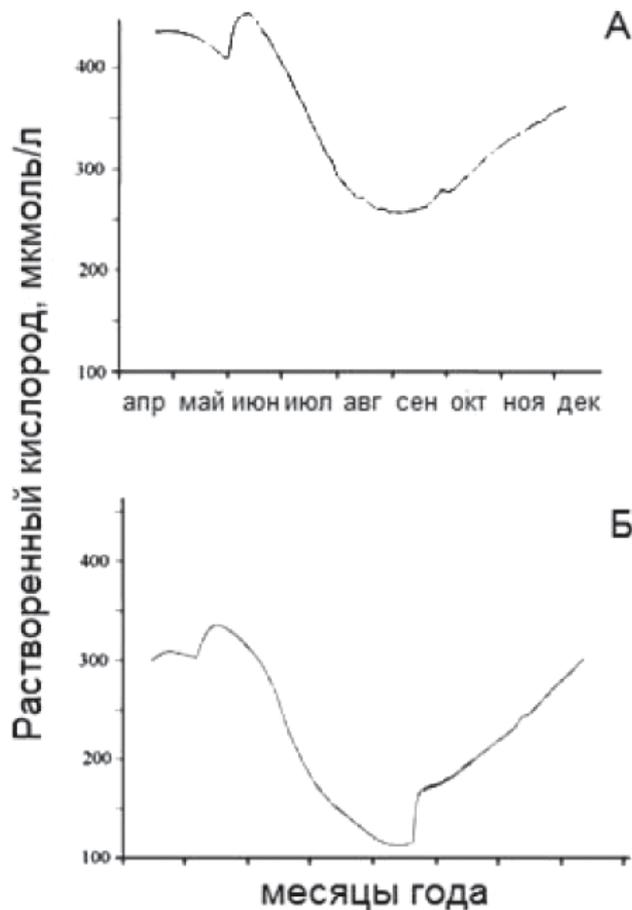


Рис. 7. Изменение растворенного кислорода в течение года.

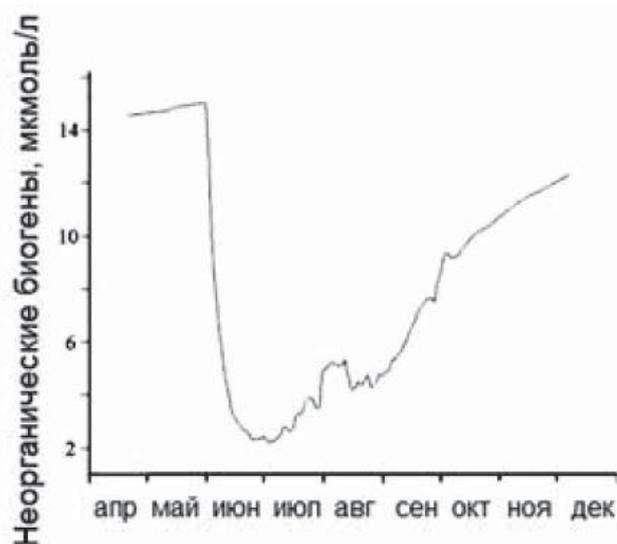


Рис. 8. Изменение содержания NUT в течение года.

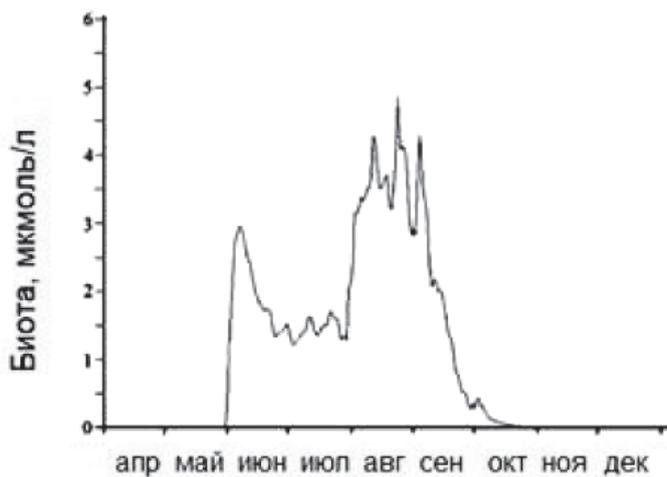


Рис. 9. Изменение содержания биоты в течение года.

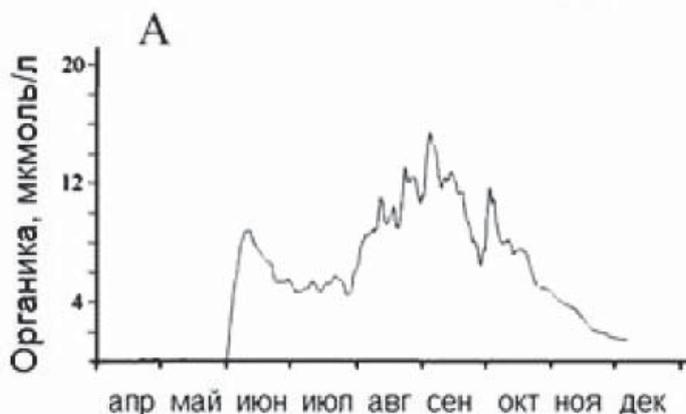


Рис. 10. Изменение содержания органики в течение года.

раньше, и концентрация кислорода значительно снизилась, что привело к возникновению гипоксии. Концентрация кислорода в поверхностном слое достигла 100 мкмоль/л (рис. 7, Б), а в более глубоких слоях концентрация снизилась до концентраций, соответствующих гипоксии и более низких (30 мкмоль/л). Это явилось причиной внезапной смертности биоты в июне и прекращения нормального ежегодного развития экосистемы. Как известно из наблюдений [13], летняя гипоксия/аноксия приводит к уничтожению донных организмов и гибели рыб. Кроме того, недостаток кислорода способствует развитию вредных водорослей и негативным воздействиям образующихся опасных веществ на процессы самоочищения.

Заключение

Применение упрощенной биогеохимической модели ОхуДер, соединенной с 3D моделью (такой как GETM, ROMS, HAMSOM), может быть эффективным инструментом для анализа и прогноза измене-

ний биогеохимического режима мелководных водоемов со сложным рельефом дна при воздействии различных внешних сил как естественного, так и антропогенного происхождения. В частности, можно использовать предложенную параметризацию сезонной изменчивости органического вещества для изучения распространения загрязняющих веществ и динамики карбонатной системы. Особое внимание следует уделить использованию сигма-координат, чтобы избежать ложного вертикального перемешивания. Z-координатные модели могли бы, возможно, лучше сохранить вертикальную стратификацию, подобную той, что наблюдалась в озере-фьорде Хуннбунн.

Увеличение температуры воды, вызванное тепловым загрязнением, значительно сдвигает даты начала цветения и его интенсивность, что может привести к усилению эвтрофикации и формированию зон гипоксии.

Литература

1. Diaz R.J. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems / Diaz R.J., Rosenberg R. // Science. 2008. V. 321. N 5891. P. 926–929.
2. Savchuk O.P. Large-Scale Dynamics of Hypoxia in the Baltic Sea // The Handbook of Environmental Chemistry. 2011. 1-24, DOI: 10.1007/698_2010_53
3. Murray J.W. The suboxic zone in the Black Sea / Murray J.W., Codispoti L.A., Friederich G.E. In: Huang, C.P., O'Melia R., Morgan J.J. (Eds.) // Aquatic chemistry: interfacial and interspecies processes. 1995. Adv. Chem. Ser. 244, American Chemical Society, Washington DC: 157-176.
4. Ström, T.E. Hunnebotn: a seawater basin transformed by natural and anthropogenic processes. / Ström, T.E., Klaveness D. Estu. Coast // Shelf Sci. 2003.V. 56. N 5-6/ P. 1177-1185.
5. Staalstrøm A. Water exchange and water quality in Hunnbunn – Evaluation of dredging in the Thalbergsund with regard to improved water quality / Staalstrøm A., Bjerkgeng B., Yakushev E., Christie H. // 2009, NIVA report no. 5874 P. 53.
6. Pavlidou A. Biogeochemical Characteristics in the Elefsis Bay (Aegean Sea, Eastern Mediterranean) in relation to anoxia and climate changes / Pavlidou A., Kontoyiannis H., Anagnostou Ch., Siokou-Frangou I., Pagou K., Krasakopoulou E., Assimakopoulou G., Zervoudaki S., Zeri K., Chatzianestis J., Psyllidou-Giouranovits R. // The Handbook of Environmental Chemistry, 2011, 1-41, DOI: 10.1007/698_2010_55

7. Berge J.A. Overvåking av forurensningssituasjonen i Indre Oslofjord 2009. / Berge J.A., Amundsen R., Bjerkgeng B., Bjerkgnes E., Espeland S.H., et al. // 2010, NIVA report no. 5985, pp.145.

8. Skei J. Seasonal and vertical variations in the chemical composition of suspended matter in an oxygen deficient fjord. / Skei J., Melsom S. // Estuarine, Coastal and Shelf Sciences. 1982. № 14. P. 61-78.

9. Stips A. Simulating the temporal and spatial dynamics of the North Sea using the new model GETM (General Estuarine Transport Model) / Stips A., Bolding K., Pohlman T., Burchard H. // Ocean Dynamics. 2004. № 54. P. 266-283.

10. Shchepetkin A.F. The Region Ocean Model System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. // Ocean Modell. 2005. № 9. P. 347-404.

11. Schrum C. Recent climate modelling for North Sea and Baltic Sea. / Schrum C., Janssen E., Hubner U. // Model description and validation. – Berichte des Zentrums für Meeres- und Klimaforschung, Universität Hamburg, 2000. Part A. P. 37.

12. Yakushev E.V. Modelling of the Meromictic Fjord Hunnbunn (Norway) with an Oxygen



Depletion Model (OxyDep) / E.V. Yakushev, E.I. Debolskaya, I.S. Kuznetsov, A. Staalstrøm // The Handbook of Environmental Chemistry, 2011, 1-17, DOI: 10.1007/698_2011_110

13. Debolskaya E. I. Analysis of the hydrophysical structure of the Sea of Azov in the period of the bottom anoxia development / Debolskaya E.I., Yakushev E.V., Kuznetsov I.S. // J. of Marine Systems. 2008. V. 70. N 3-4. P. 300-307.



G.A. Saminsky, E.I. Debolskaya, I.S. Kuznetsov, E.V. Yakushev

MATHEMATICAL MODEL OF ANAEROBIC INFECTION IN RESERVOIRS

The work is devoted to the study of hydro capacity and biogeochemical regimes of meromictic reservoir using integrated biogeochemical model OxyDep and three-dimensional hydrodynamic model GETM on the example of Hunnbunn model and Shatursky lakes coolers. Parameterization of oxygen depletion processes was the main purpose, which lead to the formation of anaerobic conditions in the water column.

The OxyDep model takes into account 5 main variables: dissolved oxygen,

inorganic nutrients, dissolved organic matter, suspended organic matter, biota and describes the main processes responsible for changes in conditions of oxygen in the water column, that is synthesis of organic matter, decomposition of organic matter in the process of oxygen oxidation or denitrification, oxygen consumption for oxidation of metals (Fe, Mn), and sulfur and boundary processes (exchange at the «air-water» and the exchange between water and sediment). The results of the experiments reproduced the observed

features of the structure of the reservoir and allowed to find the main factors determining the formation of biogeochemical structure of meromictic water bodies. Analysis of the results of the experiments and comparisons with observations have shown that the simplified biogeochemical model can be used as an effective tool to study and predict changes in oxygen and nutrient regimes.

Key words: modeling, stratified basin, hypoxia, anoxia