

=====МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ=====
=====«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ»=====

УДК: 574.5; 502.3

Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона

©2012 Картушинский А.В.*^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

²Институт биофизики СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

Аннотация. На основе одномерной численной модели вертикальной структуры водной экосистемы, включающей концентрацию лимитирующего биогенного элемента, биомассу фитопланктона с соответствующими кинетическими характеристиками и биотическими показателями, представлены определенные закономерности временной изменчивости распределения фитопланктона в поверхностном слое соленых и пресноводных озерных экосистем под действием гидрофизических процессов. Представлена оценка масштабов реакции поверхностного слоя на интенсивность атмосферного воздействия. Показаны эффекты гидрофизического воздействия на изменчивость концентрации фитопланктона в поверхностном слое водных систем, в том числе и для интерпретации спутниковых данных.

Ключевые слова: математическая модель, водная экосистема, гидрофизические процессы, фитопланктон, хлорофилл, биогенный элемент, дождевые осадки, апвеллинг, турбулентная диффузия, изменчивость, неоднородности.

ВВЕДЕНИЕ

Исследователи, изучающие биологические процессы в водной экосистеме, обычно сталкиваются с проблемой оценки действия факторов биологической и физической природы (совместно и по отдельности) на распределение и функционирование фитопланктона. Экологические математические модели водных систем зачастую строятся с акцентом на моделирование биологических процессов с минимальными входными физическими параметрами [1, 2, 3, 4]. Существуют другие подходы, когда в основу моделей заложены физические процессы, воздействующие на биологические объекты, как на пассивную примесь [5, 6]. Однако распределение фитопланктона определяет условия его функционирования, и оно обусловлено действием абиотических факторов. Эти факторы, в конечном счете, формируют условия функционирования всей экосистемы [7]. Наиболее важными показателями структурной организации распределения фитопланктона можно считать пространственные и временные масштабы изменчивости гидрофизических факторов [8, 9, 10]. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах, приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия функционирования системы в целом. В механизме эволюции экологических систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов, часто выступающие в качестве

*kartalvas@rambler.ru

генератора и обеспечивающие оптимальную настройку трофических связей внутри экосистемы [7].

Одним из важных факторов, обуславливающих распределение фитопланктона, является соленостный режим, который формирует плотностную стратификацию водных экосистем.

Следует отметить, что существует диспропорция между степенью изученности гидрофизических процессов в пресных и соленых экосистемах. Математическое моделирование факторов воздействия на распределение и функционирование фитопланктона, отражающего суть первичного продуцирования экосистемы, позволяет выявлять динамические особенности влияния факторов внешней среды и проводить анализ связи между изменяющейся средой обитания и пространственно–временными изменениями структуры биотических компонент водной экосистемы. На уровне постановки задачи изучения механизмов самоорганизации, самоадаптации и эволюции водной экосистемы важно найти период времени, в течение которого осуществляется внешнее воздействие, при котором устойчивое состояние водной среды определяет возможности адаптации организмов к изменяющимся условиям существования и воспроизводства.

Интенсивно развивающиеся методы дистанционного измерения характеристик водных экосистем позволяют исследовать структурную организацию поверхностного слоя водных систем [11]. Однако формирование стратификации экосистемы во многом определяется интенсивностью ветрового воздействия и соответствующего отклика в перемещении водных масс в вертикальном направлении, что отражается на поверхностной организации биотических компонент.

На коротких временных интервалах обострение неоднородного распределения фитопланктона удобнее всего моделировать при помощи одномерных суточных моделей, которые позволяют учитывать разнообразные эффекты гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона. В данном случае применяется модернизированная модель, по базисному варианту численной модели вертикального распределения фитопланктона, описанной в работах [12, 13, 14, 15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы, используемые в работе, получены в экспедициях Института биофизики Сибирского отделения РАН для глубоководного пресного озера Байкал в 1979, 1981, 1988 годах и для мелководного солоноватого озера Шира (Хакасия, Россия) в 1999–2001 годах. Морфологические характеристики для исследуемых объектов: площадь водной поверхности оз. Байкал – 31 722 км², средняя глубина – 745 м. Площадь водной поверхности оз. Шира – 35.9 км², средняя глубина – 18 м. Для проведения исследований и моделирования в качестве исходных данных применяются следующие параметры:

- гидробиологические: распределение концентрации хлорофилла по вертикали, концентрация хлорофилла «а» для отдельных таксонометрических групп водорослей (синезеленых, диатомовых), концентрация биогенных элементов, оптические характеристики столба воды, концентрация кислорода, видимость белого диска (Секки);

- гидрологические: вертикальные профили температуры воды и солености, морфометрические параметры, горизонтальное распределение температуры поверхностных вод, компоненты скорости течения;

- метеорологические: скорость и направление ветра; интенсивность солнечной радиации, температура воздуха, атмосферное давление, влажность, облачно.

Кроме того в работе использованы данные, полученные автором по поверхностной температуре воды оз. Шира и глубине места, измеренные с моторной лодки прибором

LMS–350A Lowrance с проходами галсами и координатной привязкой по GPS с одного берега озера до другого.

Исходные данные используются для реализации численной модели вертикального распределения температуры воды, концентрации фитопланктона и лимитирующего биогенного элемента. Блок–схема модели показана на рисунке 1.

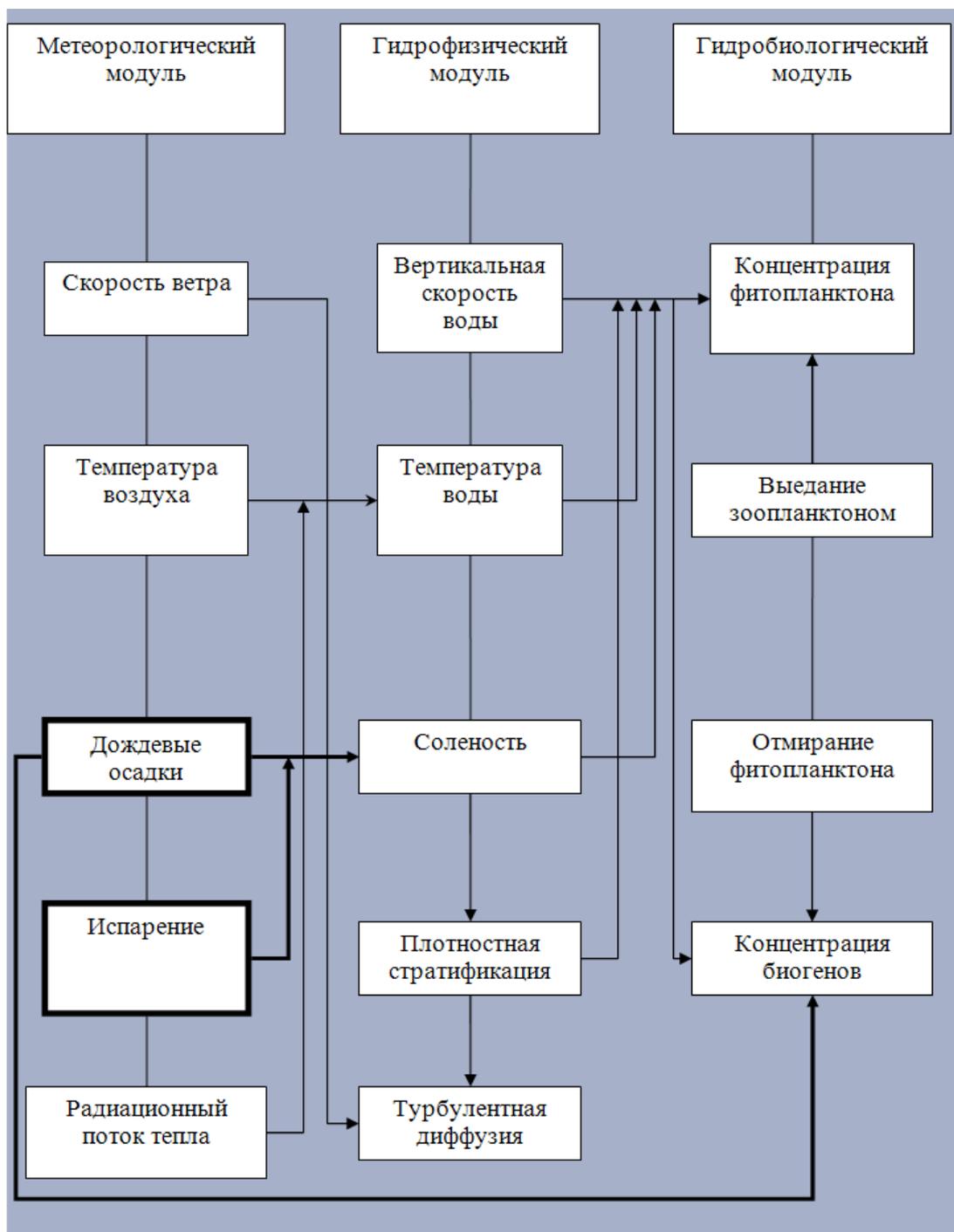


Рис. 1. Блок-схема численной модели. Жирными линиями выделены элементы модернизированной модели.

В данном случае модель адаптирована к водной экосистеме, для которой рассчитываются вертикальные профили температуры воды, питательных веществ (нитратный азот, мгN/м^3), фитопланктона (величина биомассы (мгC/м^3), концентрация хлорофилла «а» (мгХл/м^3 – в зависимости от исходных данных). Модельные дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_T \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{C_p p_0} \frac{\partial Q}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + w \frac{\partial N}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial N}{\partial z} - R, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (w \pm v) \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial F}{\partial z} + Fy, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_S \frac{\partial S}{\partial z} + Q_S. \quad (4)$$

где T – температура ($^{\circ}\text{C}$); t – время (с), w – вертикальная компонента скорости движения водных масс (м/с); N – концентрация нитратного азота ($\text{мгN}/\text{м}^3$); F – биомасса фитопланктона ($\text{мгC}/\text{м}^3$); v – скорость опускания клеток фитопланктона (м/с); p_0 – плотность воды ($\text{г}/\text{м}^3$); C_p – удельная теплоемкость воды ($\text{Дж}/\text{кгK}$); Q – результирующий поток тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); y – скорость фотосинтеза (сут^{-1}); R – источник и сток биогенных элементов, связанный с биохимическими процессами ($\text{мг}/\text{м}^3\text{с}$); K_S – коэффициент турбулентного обмена соли ($\text{м}^2/\text{с}$); K_T – коэффициент турбулентного теплообмена ($\text{м}^2/\text{с}$); K_m – коэффициент турбулентного переноса массы ($\text{м}^2/\text{с}$); Q_S – источник и сток соли, связанный с испарением и осадками ($\text{мг}/\text{м}^3\text{с}$).

Конечно-разностная аппроксимация модельных дифференциальных уравнений проводится по неявной численной схеме и решается методом прогонки в области счета $\Omega(0 \leq h \leq H; 0 \leq t \leq \theta)$. Расчетная область задается от поверхности до заданной глубины H и шагом сетки $h = 1$ м с временным шагом $t = 1$ час до заданного момента времени θ .

Начальные условия для температуры воды задаются профилями температуры воды для соответствующих водных объектов на основе натуральных данных. Граничные условия для потока тепла задаются в следующем виде:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = Q_0(t); \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = T_0. \quad (5)$$

Начальные условия для питательных веществ и фитопланктона задаются вертикальными профилями концентрации нитратного азота и биомассы фитопланктона (либо концентрации хлорофилла), исходя из экспериментальных данных, с граничными условиями вида:

$$\left. \frac{\partial N}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial N}{\partial z} \right|_{z=H} = \text{const}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=H} = 0. \quad (7)$$

Граничные условия для расчета солёности воды имеют следующий вид:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial z} \right|_{z=0} = f(t); \quad \left. \frac{\partial S}{\partial z} \right|_{z=H} = S_H, \quad (8)$$

где $f(t)$ – функция для учета осадков и испарения ($\text{мг}/\text{м}^2\text{с}$), S_H – концентрация солёности на глубине H ($\text{мг}/\text{м}^3$).

В последнем члене уравнения (2) учитывается потребление фитопланктоном нитратов и поступление этого биогенного элемента за счет разложения отмерших организмов:

$$R = CF \left(\frac{y}{b} - y_0 \right), \quad (9)$$

где $C = 0,25$ – взаимозэквивалентная величина для перевода из мгС в мгN , $b = 0.004$ – экономический коэффициент потребления, y_0 – скорость естественного отмирания фитопланктона (сут^{-1}).

Последнее слагаемое уравнения (3) выражает функциональную зависимость изменения биомассы фитопланктона от температуры воды, условий освещенности, количества биогенных элементов, естественного отмирания и выедания зоопланктоном.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Неоднородности и пространственные масштабы водных объектов

Если для океанов и морей размеры и время существования неоднородностей, связанных с внешней средой могут ограничиваться масштабами процессов и явлений, то для других водоемов пространственной границей системы, часто является береговая черта или размер водоема. Однако, так как диапазон изменчивости неоднородностей в водной среде достаточно велик, необходимо разделять и водоемы суши, в зависимости от проявления неоднородностей, связанных с гидрофизическими процессами [9, 16, 17, 18].

Малые водоемы. Размеры водных объектов, в которых поле внешних сил однородно, за исключением локальных неоднородностей, сформированных мелкомасштабными турбулентными воздействиями атмосферы. Необходимо учитывать, что большая роль в формировании термического и гидрологического режима, принадлежит притоку и стоку вод, переносимых постоянными и временными водотоками.

Средние водоемы. Масштабы водоемов таковы, что существенную роль играют атмосферные синоптические образования, под действием которых возможно формирование термической структуры на мелкомасштабном уровне и возникновение значительных циркуляционных движений, связанных с мезомасштабным и синоптическим интервалом изменчивости. Однако масштабы такого водоема еще недостаточны для развития движений, вызванных широтной неоднородностью поступающего тепла и энергии.

Крупные водоемы. В масштабах таких объектов, наряду с вынуждающим действием атмосферных процессов, развитие движений тесно связано с сезонной неоднородностью поступления тепловой энергии Солнца, глобальным переносом воздушных и водных масс, влиянием изменяющейся с широтой силой Кориолиса. Неоднородности, создаваемые в поле гидрологических характеристик, могут формироваться достаточно длительное время и служить фоном, на котором развиваются колебания меньших масштабов. Характерные масштабы таких объектов могут достигать тысячи километров. К таким водоемам относятся наиболее крупные озера и внутренние моря.

Согласно такой классификации озеро Шира можно отнести к малым водоемам, а Байкал к крупным. Таким образом, пространственные границы объектов и пространственные границы динамических процессов являются параметрами, на основании которых можно судить о возможном действии крупномасштабных сил, для которых характерны значительная интенсивность и большие временные масштабы, т.е. с увеличением масштабов границ объекта растет вклад в общую изменчивость процессов мезомасштабных и крупномасштабных. Успех исследования процессов

внутри отдельных экосистем зависит от знания характеристик взаимодействия между элементами систем, а также между окружающей средой и отдельными элементами.

2. Оценка взаимодействия между приводным слоем атмосферы и поверхностным слоем водной системы

Взаимодействие приводного слоя атмосферы и приповерхностного слоя воды сказывается на распределении тепла и массы и, следовательно, отражается на распределении и функционировании планктонных организмов. При этом пограничные эффекты, в основном связанные с формированием турбулентного переноса на фоне суточных и сезонных изменений метеоусловий, создают динамические факторы для перемещения живых организмов.

В нашем случае реализованы алгоритмы расчета взаимодействия приповерхностного слоя атмосферы и водной поверхности для численного моделирования турбулентного теплообмена, основанного на решении диффузионных уравнений переноса тепла и массы. Для приводного слоя атмосферы вводятся коэффициенты сопротивления в воздухе и воде, параметр шероховатости поверхности воды, скорость ветра. Тепловой поток на поверхности используется в качестве верхнего граничного условия, для которого на основе метеорологических данных рассчитывается энергетический баланс свободной поверхности воды с учетом всех составляющих радиационного баланса. В качестве входных метеопараметров вводятся: температура воздуха, атмосферное давление, удельная влажность воздуха и альbedo. Для моделирования изменчивости солености рассчитывается режим испарения и распределения (за счет дождевых осадков).

Из-за того, что в приводном слое атмосферы достаточно низкая механическая и термическая инерционность, и благодаря сильному турбулентному перемешиванию, вертикальная структура слоя быстро приспосабливается к меняющимся внешним условиям. При этом в пределах этого слоя толщиной $L_a \approx 100$ м, плотностью $\rho_a \approx 10^3$ г/м³, напряжением трения $\tau \approx 1$ дин/см² и скоростью ветра $W = 10$ м/с, можно оценить временной T_s и пространственный X_s масштабы релаксации атмосферного слоя, которые определяются по соотношениям: $T_s = (\rho_a \cdot L_a \cdot W) / \tau \approx 100$ сек, $X_s = W T_s \approx 1000$ м.

Если примерно оценить временной и пространственный масштаб реакции водного слоя толщиной $L_w = 10$ м, плотностью $\rho_w = 1$ г/см³, на ветровое напряжение, скорость в котором порядка 5 см/с, то временной масштаб составляет порядка 1.4 часа, а минимальный горизонтальный пространственный масштаб температурных неоднородностей порядка 250 м. Предложенная аналитическая реализация модели подтверждается данными натурных измерений полей поверхностной температуры водной системы (рис. 2а) и распределения мутности (рис. 2б) для оз. Шира.

Таким образом, для оценки временной изменчивости структуры верхнего слоя при взаимодействии приводного слоя атмосферы и поверхностного слоя водной системы необходимо использовать характерные времена развития и затухания процессов. Необходимо учитывать проявление периодичности динамических процессов, интенсивность развития которых, обусловлена определенными механизмами генерации, диффузии, диссипации кинетической энергии и действием основных физических сил: инерции, плавучести, давления и трения. Для малых водоемов режим изменения солености будет соответствовать масштабу изменчивости термических неоднородностей, в том числе и в связи с осадками, изменяющими температуру и соленость в верхнем слое, и, как фактор, создающий дополнительный приток биогенных элементов.

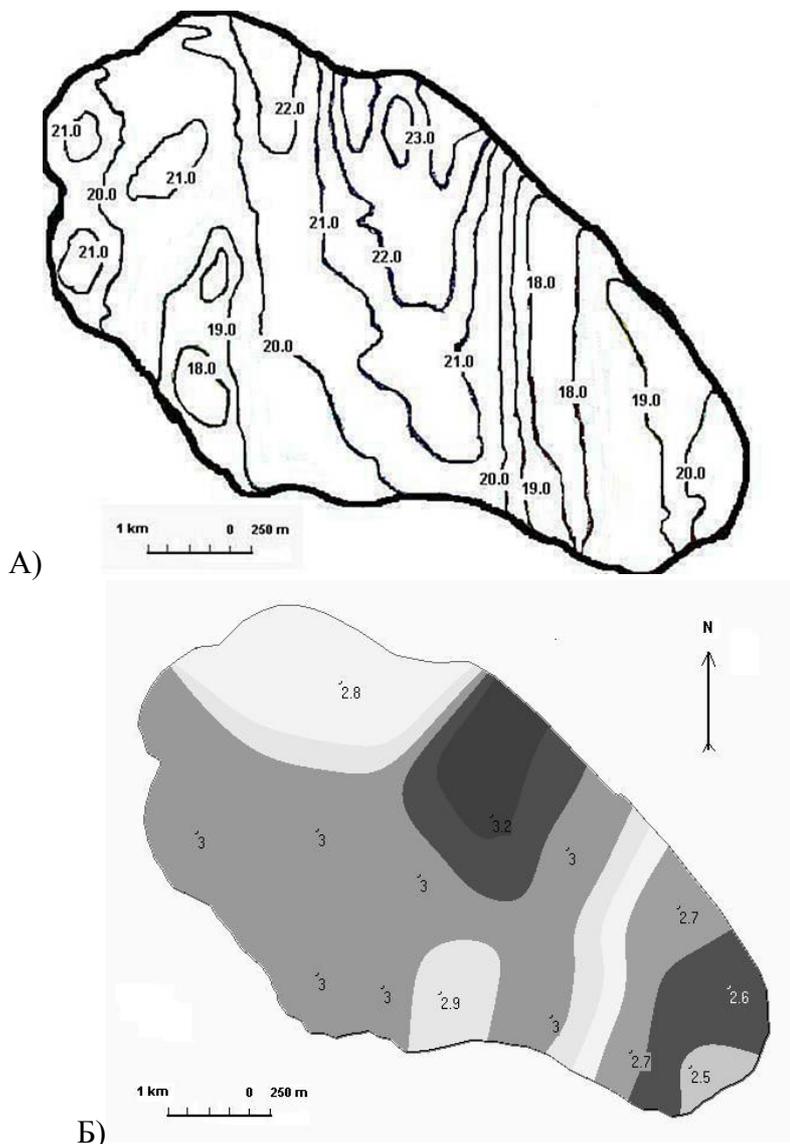


Рис. 2. Измеренные с борта моторной лодки характеристики оз. Ширы. А) – поверхностное поле температуры для 25.07.2000 г.; Б) – распределение значений мутности по диску Секки для 08.08.2000 г.

3. Моделирование эффектов гидрофизического воздействия на фитопланктон

Как известно, изменение термической структуры водоема формирует различия по плотностной устойчивости вод. Напряжение трения и турбулентное перемешивание за счет усиления ветровой нагрузки создает соответствующее динамическое воздействие на поверхность. Это приводит к увеличению толщины эпителиона и обострению плотностных градиентов в металимнионе, что отражается на распределении фитопланктона [14] и его кинетике потребления пищи и продуцировании [19, 20, 21].

Чтобы исключить случаи влияния солености на стратификацию вод рассмотрим пресноводный водоем. На верхней границе водоема моделируются условия поступления биогенного элемента в эпителион за счет дождевых осадков, на нижней границе расчетной сетки поток питательного вещества задается постоянной величиной. Для проверки условий функционирования и вертикального распределения фитопланктона с различной плавучестью в модель вводятся морфологические характеристики: для синезеленых групп фитопланктона – с положительной плавучестью, для диатомовых – с отрицательной. Скорость пассивного опускания клеток рассчитывалась по формуле Стокса.

Данные расчетов показывают, что когда на верхней границе водного объекта имеет место поток биогенов с дождевыми осадками, необходимо учитывать суточную периодичность поступления осадков в поверхностный слой водной экосистемы. Осадки существенно влияют на распределение и функционирование фитопланктона (рис. 3).

Поток биогенных элементов с поверхности в виде осадков и соответствующая турбулентная накачка, за счет периодического увеличения скорости ветра, формируют устойчивое вертикальное неоднородное распределение фитопланктона. При этом, вне зависимости от плавучести клеток на поверхности, происходит увеличение биомассы фитопланктона.

Для водных экосистем важным эффектом гидрофизического воздействия является скорость выравнивания пространственных неоднородностей, в первую очередь термических и соленостных. Как было показано выше, скорость выравнивания зависит от интенсивности ветровой нагрузки на поверхности.

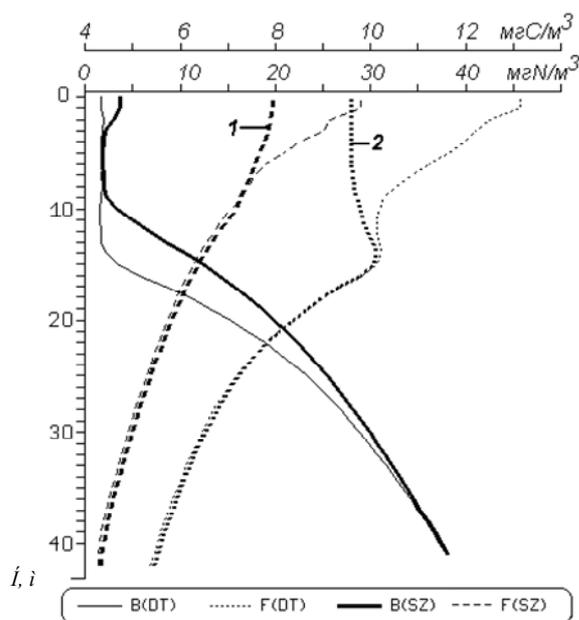


Рис. 3. Изменчивость вертикальных профилей нитратного азота (V) и биомассы (F) под действием периодической ветровой нагрузки (от 1 до 5 м/с) и дождевых осадков через 4 суток (начальные профили – линейные) для диатомовых и синезеленых групп фитопланктона; кривые 1 и 2 – для синезеленых и диатомовых, соответственно, без поступления биогенного элемента с осадками.

В течение летнего периода 2001 года на оз. Шира получены данные по изменению температуры воды, солености и вертикальному распределению хлорофилла для точки с максимальной глубиной 20 метров. Данные по вертикальному и горизонтальному распределению характеристик получены при достаточно спокойных метеорологических условиях со слабым ветром, а также после штормовых условий с дождем и скоростью ветра до 20 м/с.

На рисунке 4 показана температура поверхности воды, измеренная с борта катера при проходе галсами от одного берега до другого по всей ширине озера, до штормовых условий (10 августа 2001 г.) и после прохождения шторма (12 августа 2001 г.). Так как озеро Шира является малым водоемом, время съемки поверхностной температуры по площади озера занимало порядка 20 минут.

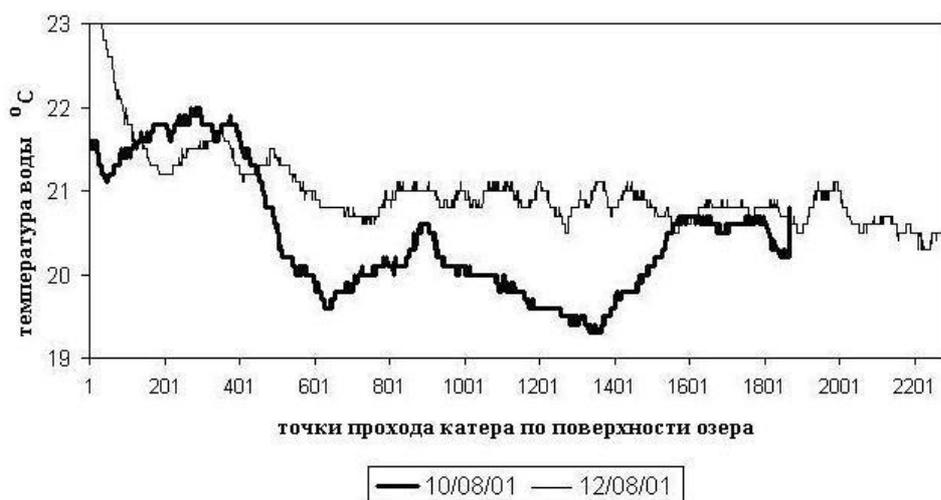


Рис. 4. Изменения поверхностной температуры оз. Шира до шторма (10.08.2001 г.) и после шторма (12.08.2001 г.).

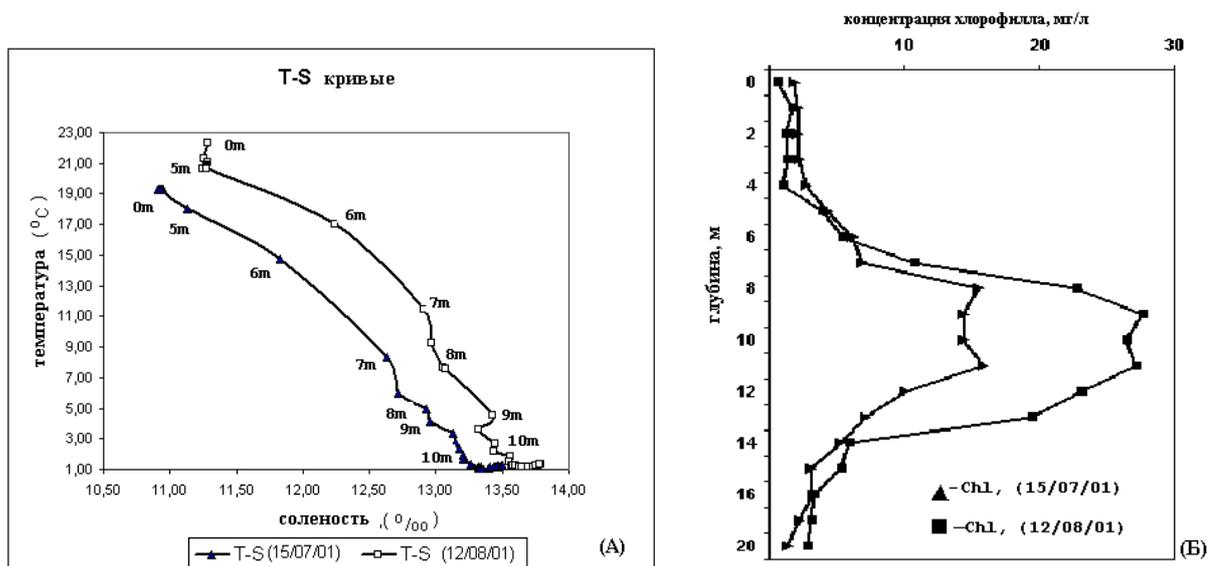


Рис. 5. Изменчивость вертикальной структуры водных масс – (А) и распределения фитопланктона – (Б) для глубинной станции оз. Шира для 15 июля и 12 августа 2001 г.

Из рисунка 4 видно, что штормовые условия привели к разрушению пространственных неоднородностей температуры в эпилимнионе и перестройке вертикального распределения водных масс (рис. 5А) и увеличению в два раза концентрации хлорофилла в металимнионе (рис. 5Б). Необходимо учитывать, что в период с 15 июля и до 10 августа 2001 г. наблюдались достаточно слабые ветровые условия, позволяющие предполагать, что наибольшие изменения в вертикальной структуре водной экосистемы произошли после прохождения шторма 11 августа 2001 года.

Одним из важных факторов влияющим на распределение фитопланктона является скорость перемещения водных масс. Наибольшее влияние на вертикальное распределение фитопланктона оказывают восходящие (апвеллинг) и нисходящие (даунвеллинг) движения вод. В нашем случае условия моделирования включают в себя введение периодической функции, описывающей вертикальные движения вод с различной амплитудой и направлением. Для средних и крупных водоемов зачастую проявляются специфические вертикальные движения вод, которые индуцируются

внутренними волнами и сейшевыми колебаниями [9, 18, 22]. Такие движения имеют свою периодичность и для более точного описания влияния этих явлений необходимо знание о перераспределении потоков импульса во всей толще вод. Кроме того, необходимо учитывать вертикальную турбулентную диффузию тепла и массы, определяемую периодичностью ветровых условий на поверхности водоема. Модельные эксперименты позволяют частично воспроизводить такие движения и соответствующую термохалинную структуру и распределение биомассы фитопланктона. В качестве модельных объектов рассматривались оз. Байкал и оз. Шира.

Летом на Байкале хорошо выражен суточный ход скорости ветра, связанный с термическими различиями суши и воды. Тот, в свою очередь, приводит к развитию бриза и горно-долинных ветров в вечерние и утренние часы [23, 24], вызывая сгонно-нагонные явления. В конечном счете эффектом таких процессов является образование локальных структур апвеллинга и даунвеллинга.

Влияние циклического вертикального переноса отмечается для большинства суточных натуральных данных по заливам Байкала. Это влияние отражается на распределении температуры и фитопланктона, что, возможно, связано с действием внутренних волн или сейшевых колебаний (рис. 6А, 6Б, 6В), так как размеры озера позволяют развиваться таким процессам. Интерес вызывает противофазность увеличения концентрации хлорофилла на поверхности по отношению к температуре воды на нижней границе слоя температурного скачка.

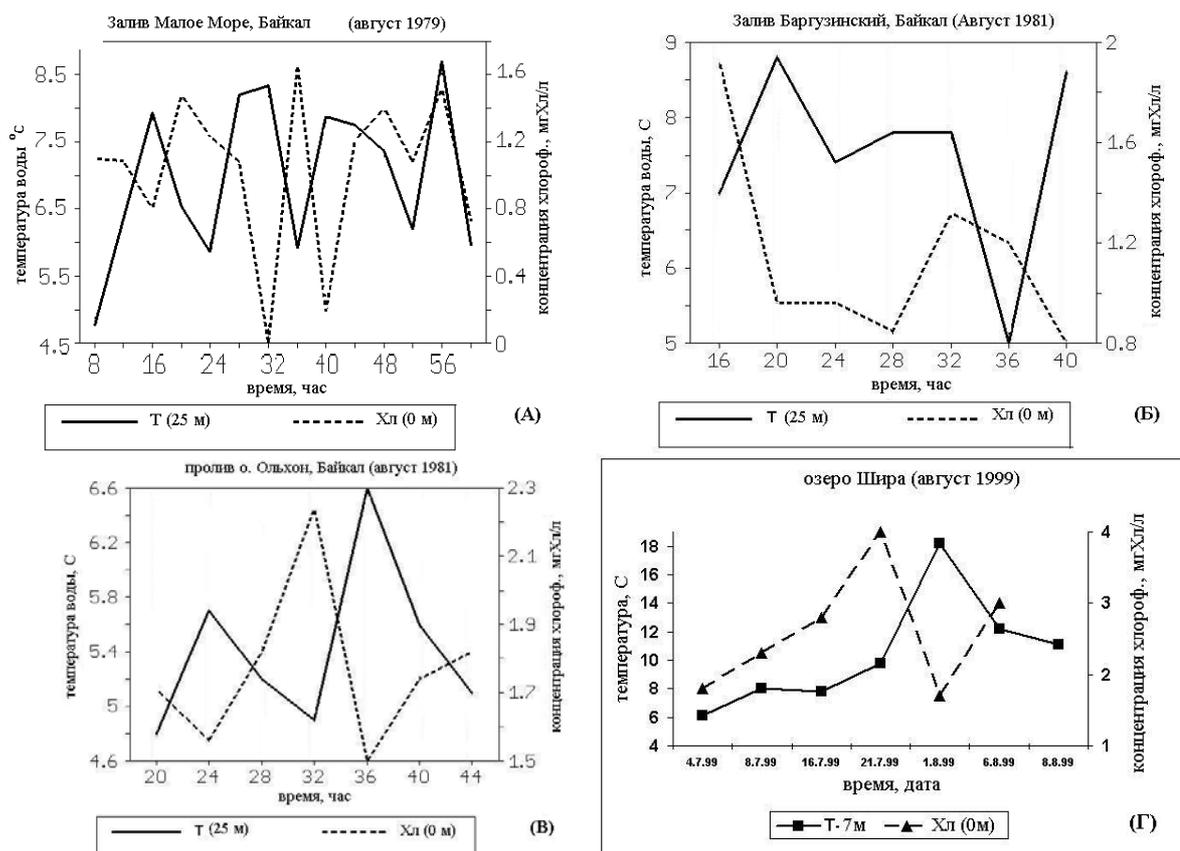


Рис. 6. Изменение температуры воды на нижней границе металимниона и концентрации хлорофилла для различных районов оз. Байкал (А, Б, В) и оз. Шира (Г).

Для сравнения данных натуральных измерений приведем результаты численных экспериментов при различных динамических условиях (рис. 7). В качестве условий моделирования вводится:

– периодическое усиление скорости ветра от 5 до 15 м/с с минимумом на 12 часов расчетного времени для учета вертикальной турбулентной диффузии;

– периодический подъем за счет вертикальной компоненты скорости переноса до 10^{-4} м/с для моделирования условий апвеллинга.

Расчеты на модели подтверждают, что совместное влияние ветра и вертикальных движений приводит к соответствующим различиям распределения биомассы по времени.

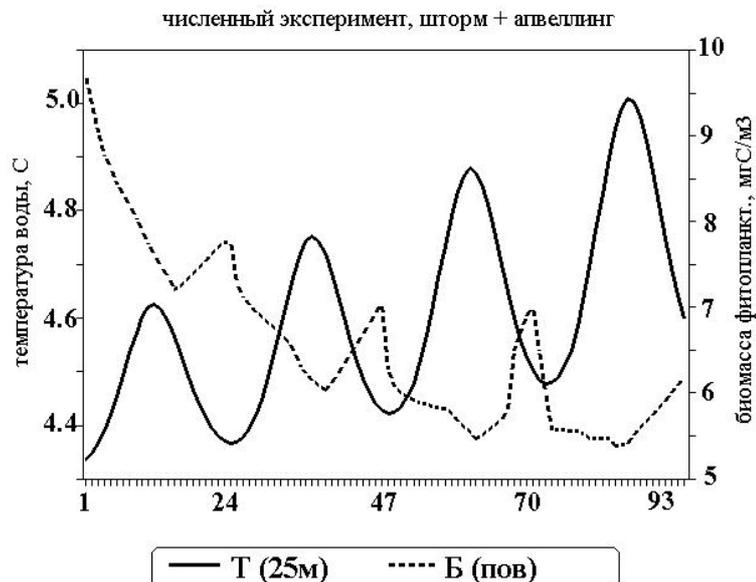


Рис. 7. Результаты численного эксперимента на модели, описывающие изменение температуры воды (Т) в слое температурного скачка на глубине 25 м соответствующее изменение биомассы фитопланктона (Б) на поверхности.

Периодический перенос вертикальными движениями вод, в условиях периодического подъема вод (апвеллинг), либо действия внутренней волны, совместно с действием ветра, приводит к изменениям температуры воды в слое скачка и биомассы фитопланктона в поверхностном слое. Периоды колебаний этих параметров во времени находятся в противофазе, что дает основание анализировать данные натурных экспериментов и, для определенных условий, прогнозировать развитие процесса формирования неоднородностей во времени. Кроме того, проявление структурных неоднородностей фитопланктона в поверхностном слое водных систем, в том числе на основе спутниковых данных, может трактоваться как эффекты воздействия конкретных гидрофизических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные трудности, связанные с процессом разработки и оценкой применимости моделей водных экосистем, сводятся к возможности классификации динамических систем, состоящих из отдельных «блоков элементов» (подсистем) по пространственно-временным интервалам, в пределах которых развиваются отдельные физические, биологические и химические процессы. Порядок изменчивости таких процессов в пространстве и во времени различен. Однако, даже при условии разнообразия связей между отдельными элементами системы, а также между элементами и окружающей средой, часто экосистема имеет свойства, проявляющиеся только в результате взаимодействия отдельных блоков и элементов системы. При этом связь и взаимодействие между блоками организовывается входными и выходными потоками тепла, массы и энергии на соответствующих границах.

Количественные и качественные оценки влияния гидрофизических процессов на формирование неоднородного распределения фитопланктона могут использоваться для

оценки суточной и сезонной продуктивности водных экологических систем, в том числе и для интерпретации спутниковых данных.

Автор выражает благодарность за финансовую поддержку работы грантами INTAS 97–0519; РФФИ 99–05–64338–а; РФФИ 02–05–64740–а; REC–002 (US CRDF).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меншуткин В.В. *Имитационное моделирование водных экологических систем*. СПб.: Наука, 1993. 160 с.
2. Йоргенсен С.Э. *Управление озерными системами*. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
3. Меншуткин В.В., Приходько Т.И. Модельное исследование вертикального распределения и продукции фитопланктона. *Гидробиологический журнал*. 1979. № 2. С. 5–10.
4. Страшкраба М., Гнаука А. *Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование*. М.: Мир, 1989.
5. Ниллер П.П., Краус Э.Б. *Моделирование и прогноз верхних слоев океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1997.
6. Хендерсон – Селлерс Б. *Инженерная лимнология*. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
7. *Информационная система «Динамические модели в биологии»* URL: <http://dmb.biophys.msu.ru> (дата обращения: 15.06.2011).
8. Картушинский А.В. *Влияние гидродинамических условий на биологическую продуктивность вод Мирового океана*: препринт Института биофизики СО РАН. Красноярск: Институт физики СО РАН, 1988. 27с.
9. Картушинский А.В. *Информационные системы. Динамические процессы в воздухе и воде*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. 103 с.
10. Картушинский, А.В. *Информационные технологии для моделирования и управления процессами в экосистемах*. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2009 С. 49–58.
11. Yang M.D., Sykes R.M., Merry C.J. Estimation of algal biological parameters using water quality modeling and SPOT satellite data. *Ecol. Modelling*. 2000. V. 8. P. 1–13.
12. Картушинский А.В., Левин Л.А. *О связи термо– и гидродинамических параметров с распределением хлорофилла «а» в Северном Байкале*. Калининград: Атлант НИИ рыб. Хоз-ва и океаногр, 1991. 36 с.
13. Картушинский А.В. Моделирование влияния совместных эффектов ветрового перемешивания и вертикальных движений на суточную изменчивость распределения клеток фитопланктона (на примере оз. Байкал). *Математические проблемы экологии*. Новосибирск. Институт математики СО РАН, 1994. С. 42–52.
14. Картушинский А. В. Влияние суточной изменчивости абиотических условий на распределение и продуцирование фитопланктона оз. Байкал. *Водные ресурсы*. 1997. № 1. С. 66–72.
15. Shevymogov A.P., Kartushinsky A.V, Vysotskaya G.S. Application of satellite data for investigation of dynamic processes in inland water bodies: Shira Lake (Khakasia, Siberia), a case study. *Aquatic Ecology*. 2002. V. 36. № 2. P. 153–163.
16. Ниллер П.П., Краус Э.Б. *Одномерные модели верхнего слоя океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 175–209.
17. Spigel R.H., Imberger J. Rayner K.N. Modelling the diurnal mixed layer. *Limnol. Oceanogr*. 1986. V. 31. № 3. P. 533–556.
18. Филатов Н.Н. *Динамика озер*. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
19. Ильичев В.Г. Идеи эволюционной экологии в моделях водных экологических систем. *Водные ресурсы*. 1993. Т. 29. № 1. С. 5–11.
20. Петрова Н.А. *Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер*. Л.: Наука, 1990.

21. Меншуткин В.В., Филатов Н.Н. Потахин М.С. Экспертная система «Озера Карелии» Классификация озер. *Водные ресурсы*. 2009. Т. 36. № 3. С. 300–311.
22. *Формирование и динамика байкальских вод*. Под ред. Верболова В.И. Покатиловой Т.Н., Шимараева М.Н и др. Новосибирск: Наука, 1986.
23. Выхристюк М.М. *Фитоклимат прибрежных лесов Северного Байкала*. Новосибирск. Наука, 1980.
24. *Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал*. Под ред. Галазий Г.И. Тр ин-та. СО АН СССР Лимнол. Ин-т. 1964. Т. 5. № 25. 194 с.
25. Bowers J.A. Note effects of thermocline displacement upon subsurface chlorophyll maxima in lake Michigan. *J.Great Lakes Res.* 1980. V. 6. № 4. P. 367–370.

Материал поступил в редакцию 12.11.2011, опубликован 26.01.2012.