

**Пушистов Петр Юрьевич**

Югорский НИИ Информационных Технологий

[push@uriit.ru](mailto:push@uriit.ru)

с.т. (34671) – 5-90-90

# **Сложные модели гидродинамики и качества поверхностных вод: проблемы использования для исследований и управления**

**Скотт Веллс, проф. Потрлендского университета США в феврале 2005 года опубликовал статью:**

**«Модели гидродинамики и качества поверхностных вод: полезное и бесполезное использование».**

**Предметы обсуждения этой статьи:**

- Типы модели поверхностных вод**
- Корреляционные или гидродинамические модели?**
- Примеры бесполезных моделей**

Сложные модели гидродинамики и качества поверхностных вод это:

- Модели динамики водных экосистем с размерностью выше 0, т.е. модели, описывающие нестационарные физические, химические и биологические процессы в водных телах с учетом взаимодействия их с атмосферой, донными отложениями и стоком с площади водосбора;
- Модели с позитивной практикой применений, включающей калибровку и верификацию моделей на основе данных экосистемных наблюдений

# Введение

- Комплексная оценка качества воды рек Оби и Иртыша на территории Ханты-Мансийского автономного округа соответствует категории **"очень грязная"**[1]. Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ (нефтепродукты, фенол, медь, цинк, марганец и др.) реки Оби и ее притоков (Вах, Большой Юган, Назым, Иртыш с притоком Конда) устойчиво превышают ПДК для рыбохозяйственных водоемов с фиксацией случаев экстремально высоких загрязнений [2].

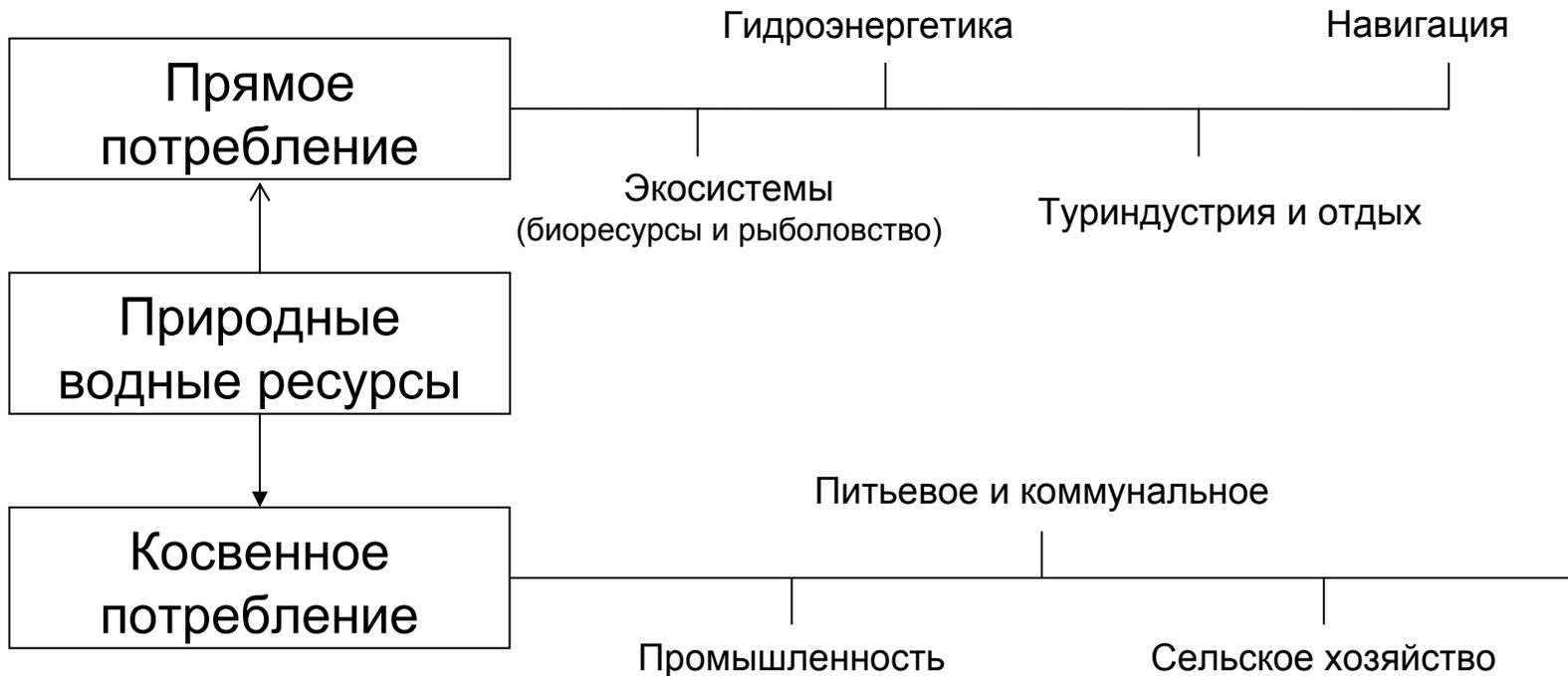
# Введение

- Экологическое неблагополучие указанных водных объектов объективно связано как с трансграничным переносом сильно загрязненных вод Средней Оби и Иртыша, так и высокой многолетней техногенной нагрузкой при сбросах коммунальных и промышленных вод, при аварийных разливах нефти. На территории водосборного бассейна Нижней Оби, включая территорию ХМАО, отсутствует современная автоматизированная система управления использованием и качеством водных ресурсов.

# Введение

- Для принятия оптимальных управленческих решений по рациональному водопользованию и улучшению качества водных ресурсов необходимо разработать и внедрить информационно-моделирующую систему (ИМС), включающую в себя моделирующий комплекс гидродинамики и качества поверхностных вод и подсистему сбора, передачи и обработки данных экологического и гидрометеорологического мониторинга.

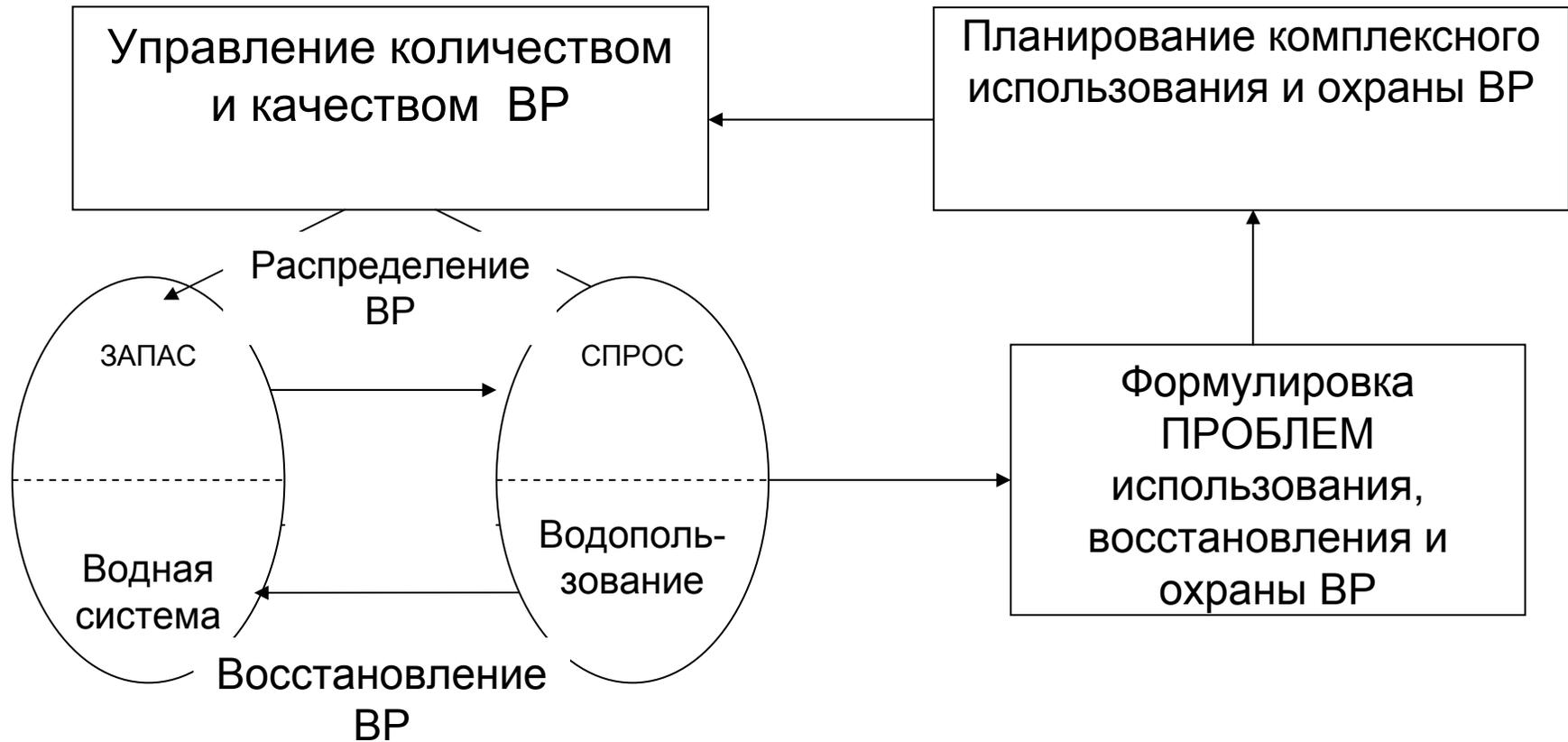
# Значимость природных водных ресурсов



## Резюме:

1. Достаточный запас высококачественной пресной воды - необходимое условие для обеспечения устойчивого экономического и социального роста и развития регионов.
2. Потребление воды для различных целей увеличивается, загрязнения пагубно влияют на качество воды, возникают острые конфликты между разными прямыми и косвенными потребителями воды

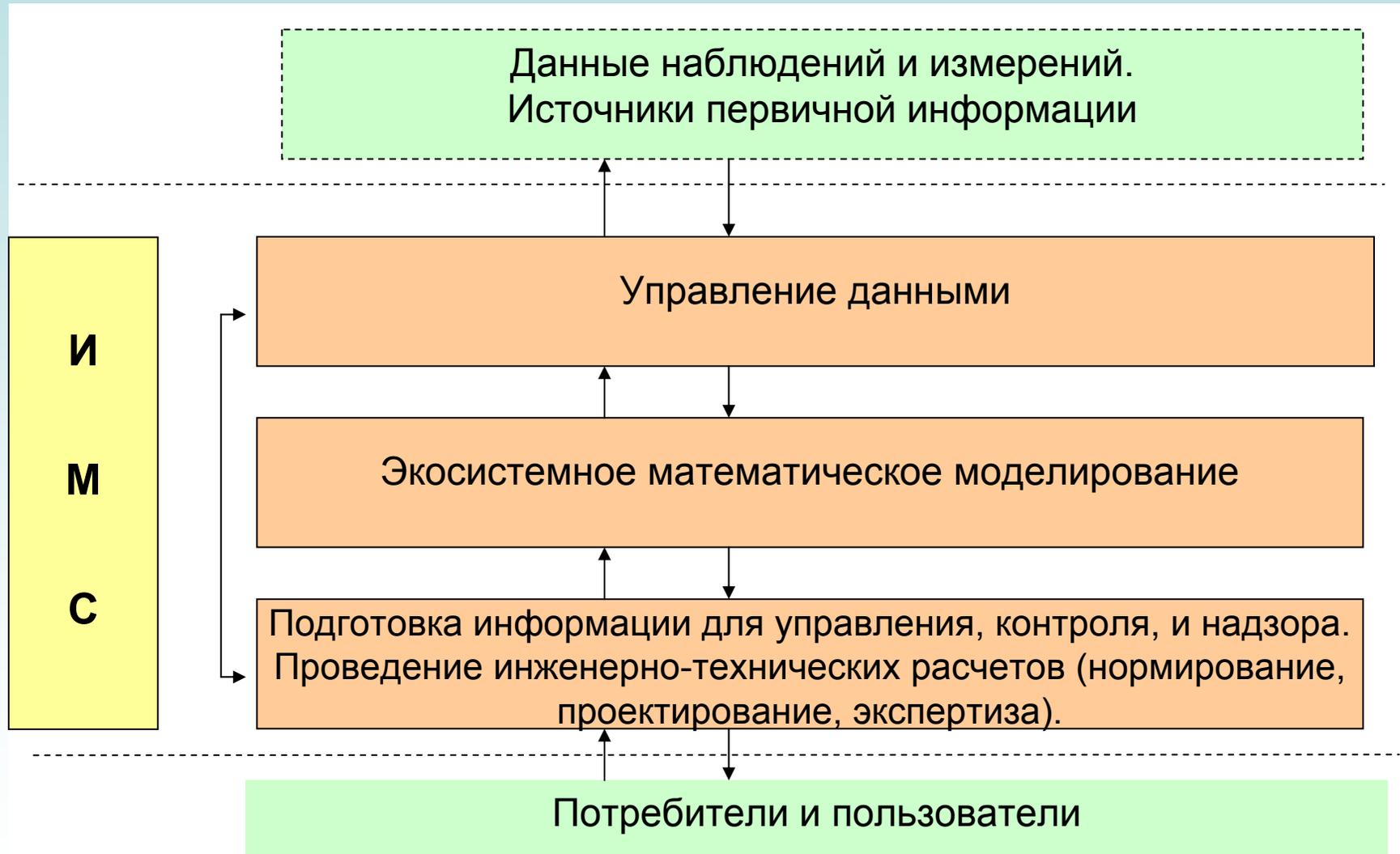
# Схема управления водными ресурсами



## Резюме:

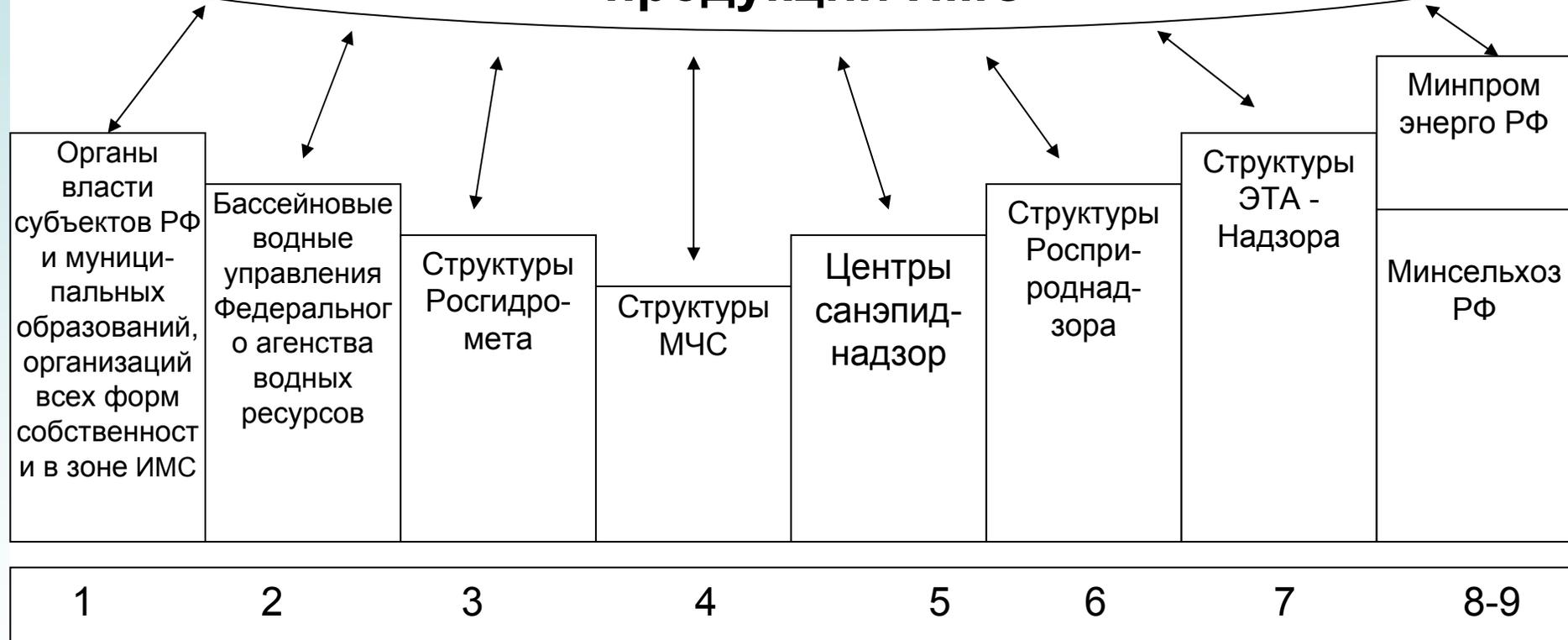
1. Основная цель эффективного управления водными ресурсами –удовлетворить спрос на запас воды при имеющихся возможностях и ограничениях средствами идентификации проблем, планирования и управления, включая меры регулирования запасов воды и спроса на нее.
2. Баланс между спросом и запасом должен содержать в себе аспекты количества и качества воды, учитывать проблемы охраны окружающей среды

# Функциональная схема ИМС



# Функциональная схема ИМС

## Пользователи и потребители продукции ИМС



### Законодательная база:

Водный кодекс РФ от 16.01.95 №167-ФЗ, изменения Кодекса, вступающие в силу с 01.01.2005г. – федеральный закон от 22.08.2004г. № 122-ФЗ (статья 65)

**1.Адаптация и подготовка  
к практическим применениям  
базового моделирующего комплекса  
(БМК) гидродинамики и качества вод**

# 1.1. Базовый моделирующий комплекс (БМК) гидродинамики и качества воды

- Ядром БМК является экосистемная нестационарная нелинейная численная модель, описывающая с высоким пространственно-временным разрешением гидрофизические, химические и биологические характеристики качества вод речных систем, водохранилищ, проточных озер и эстуариев и комбинаций из указанного [3].
- Гидродинамический блок модели позволяет вести расчет (на период до 1 года с временными шагами порядка 10 мин) уровней поверхности воды, продольной и вертикальной составляющих скорости течения, поля температуры (с разрешением по вертикали от 0.1м, вдоль водотока-100 и более метров) для водных объектов с горизонтальными размерами в диапазоне  $10^1$ - $10^3$  км.
- Модель описывает образование, нарастание и разрушение ледового покрова.
- Модель позволяет учитывать реальную динамику метеорологических параметров ( ветер, температура и влажность воздуха, балл облачности, солнечное излучение), а также характеристики ветрового и светового затенения от топографии и растительности береговой зоны.
- Модель рассчитывает характеристики турбулентности и гидрооптические переменные водного тела.

# 1.1. Базовый моделирующий комплекс (БМК) гидродинамики и качества воды

- Характеристики качества воды, описываемые моделью, включают в себя:
  - любое число характерных компонентов для которых известны скорость распада 0-го и/или 1-го порядка, и/или скорость осаждения, и/или множитель зависимости от температуры( в том числе: консервативные трасеры, бактерии кишечной палочки, загрязняющие вещества);
  - любое число групп неорганических взвешанных веществ и УБПК-групп;
  - нитраты-нитриты, аммоний, биодоступный фосфор и кремний (биогены);
  - лабильные и устойчивые, растворенные и корпускулярные органические вещества;
  - общий неорганический углерод, щелочность, общее железо;
  - растворенный кислород и процессы реаэрации;
  - любое число групп фитопланктона и эпифитона. На базе перечисленных выше переменных основного состояния качества воды могут быть рассчитаны дополнительно более 60 производных переменных, включая pH, углеродный цикл ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) и седиментные органические вещества.

# 1.1. Базовый моделирующий комплекс (БМК) гидродинамики и качества воды

- Модель может быть применена к любому числу рек, водохранилищ, озер и эстуариев, последовательно соединенных между собой. В модели учитываются боковая приточность скорости, температуры и характеристик качества воды, техногенные нагрузки от точечных и рассредоточенных источников (сбросов) загрязняющих веществ.
- Модель описывает процессы на границе раздела вода-седименты и фильтрационный приток/отток подземных вод.
- Модель обеспечивает имитационное воспроизведение функционирования сложных инженерных гидротехнических сооружений: различные типы плотин и дамб, шлюзы, водозаборные станции и водоводы.

# Примеры применения базовой модели гидродинамики и качества воды

- Основные этапы применения модели:
  - определение объекта, целей и задач моделирования,
  - подготовка баз данных для моделирования (геометрические данные, начальные и граничные условия, гидравлические и кинетические параметры),
  - калибровка и верификация модели,
  - анализ и оценка результатов моделирования.

# 1.1. Базовый моделирующий комплекс (БМК) гидродинамики и качества воды

- Практическое применение модели требует от команды пользователей знаний в следующих областях:
  1. Геофизическая гидродинамика.
  2. Гидрология и гидротехника.
  3. Гидробиология.
  4. Гидрохимия.
  5. Вычислительная математика.
  6. Компьютерное программирование и моделирование.
  7. Математическая статистика.
  8. Базы данных и знаний.

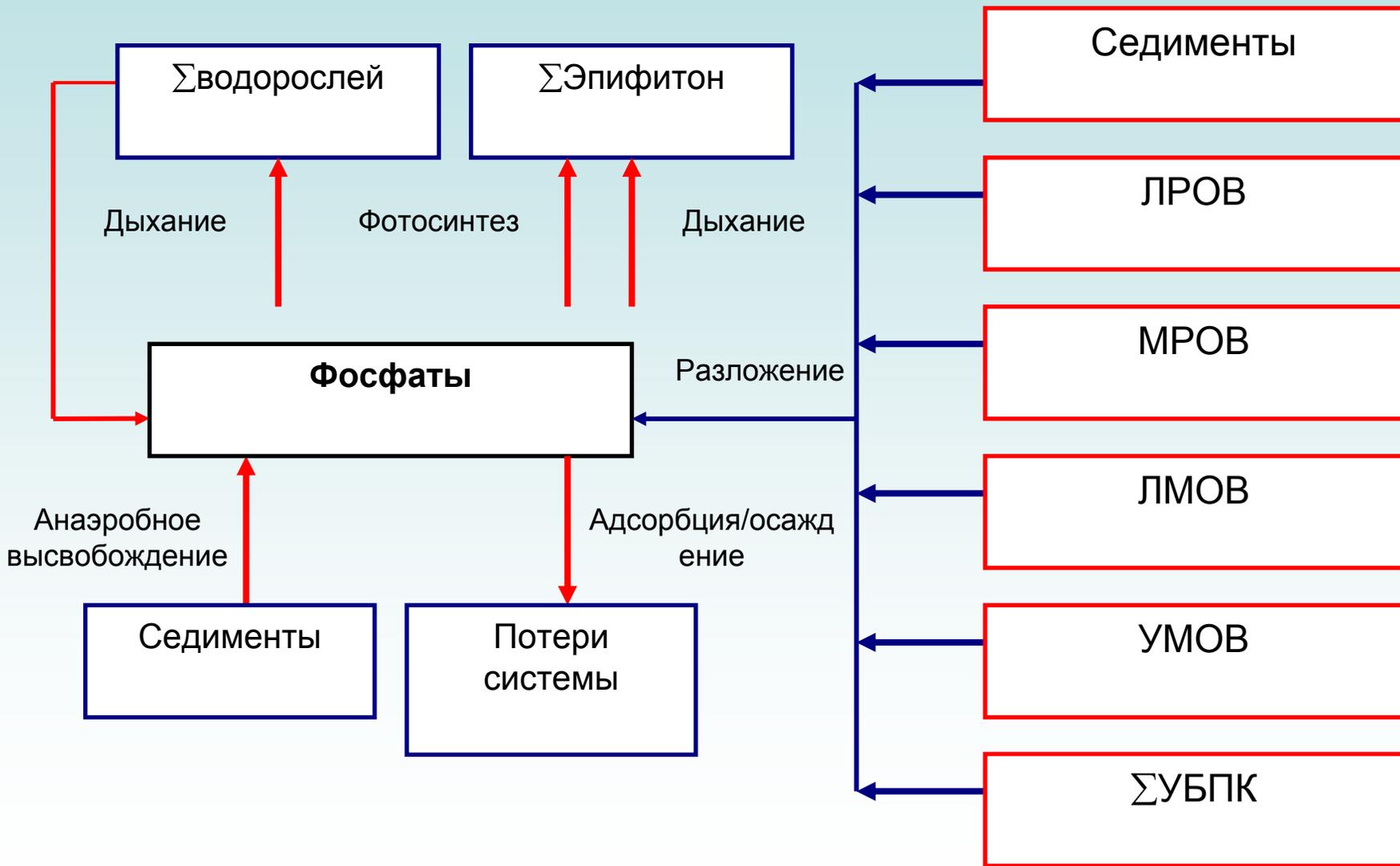
*Примеры и результаты применения модели гидродинамик и качества вод приведены ниже*

# Основные уравнения модели: гидродинамика

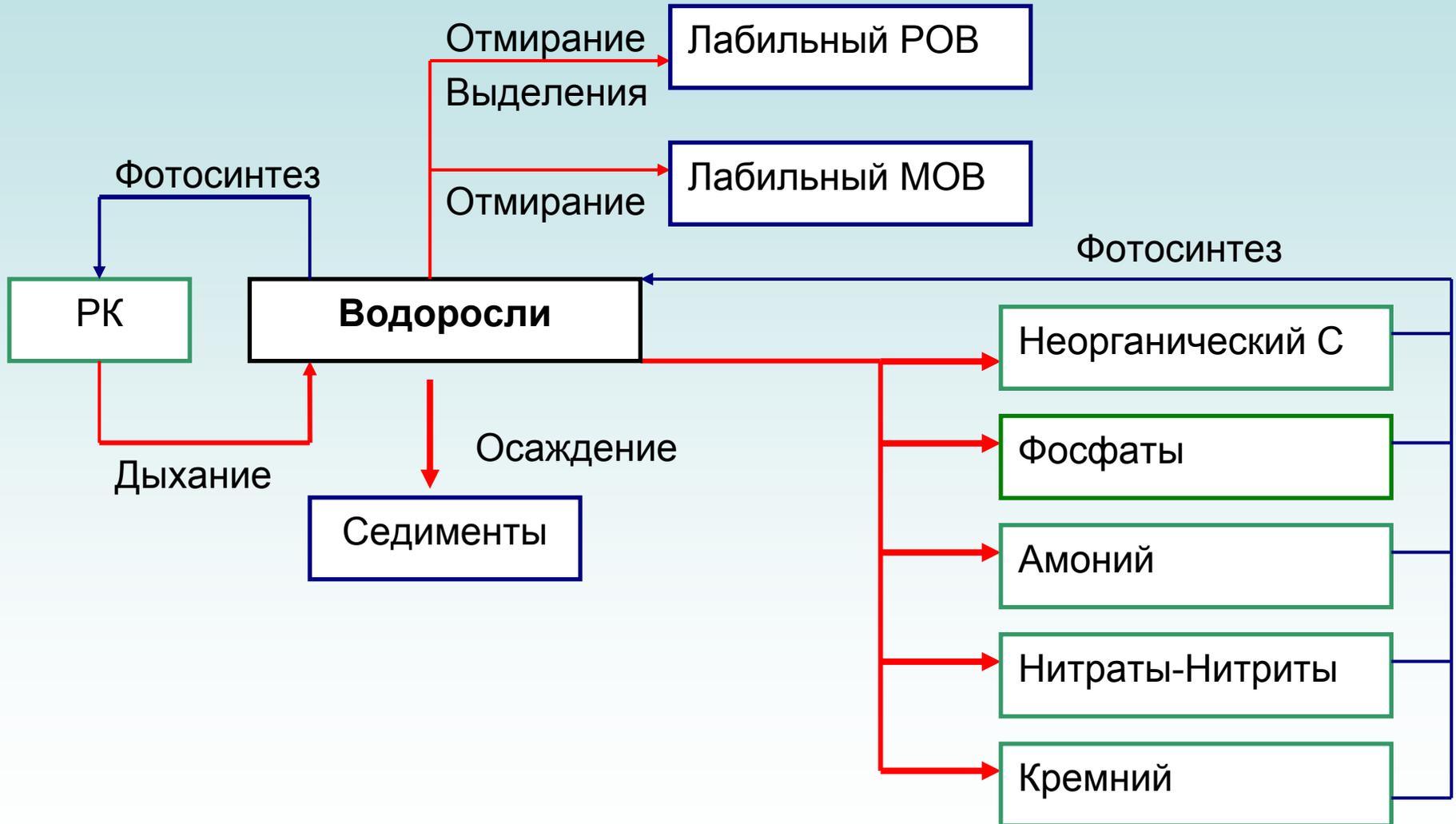
Equation	Version 3 governing equations
x- momentum	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x$
z-momentum	$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
free surface equation	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$
continuity	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
equation of state	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ss})$
Conservation of mass/heat	$\frac{\partial B \Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB \Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \left( BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q_{\Phi} B + S_{\Phi} B$

where B is the width, U is the longitudinal velocity, W is the vertical velocity, q is the inflow per unit width,  $\alpha$  is the channel angle,  $\Phi$  is the concentration or temperature,  $\eta$  is the water surface elevation, P is the pressure, h is the depth,  $T_w$  is the water temperature,  $\Phi_{TDS}$  is the concentration of TDS,  $\Phi_{ss}$  is the concentration of suspended solids,  $\rho$  is the density

# Модель динамики фосфора



# Модель динамики фитопланктона



# Модель растворенного кислорода



# Работа лаборатории по применению модели гидродинамики и качества воды

- Проведена интенсивная образовательная подготовка потенциальных пользователей БМК для сотрудников ЮНИИИТ, НПЦ "Мониторинг", Окружного Гидрометцентра и Югорского госуниверситета. Осуществлен перевод «Руководства пользователя» с английского на русский язык (объем 615 стр.), разработан курс лекции и проводятся практические занятия по дисциплине "Моделирование водных экосистем" для студентов факультета природопользования ЮГУ;

# Работа лаборатории по применению модели гидродинамики и качества воды

- создана база данных результатов гидрологических наблюдений на р. Северная Сосьва (участок реки от г/п Сосьва до г/п Сартынья) и метеорологических наблюдений на м/с Сосьва за 2003год;

# Работа лаборатории по применению модели гидродинамики и качества воды

- проведены пробные численные эксперименты с гидродинамическим модулем БМК по расчету гидрологических характеристик (уровни, скорости течения, температура) на указанном участке р.С.Сосьва при реальном метеорологическом форсинге и упрощенной аппроксимации руслового канала.

## 2. Результаты применения базового моделирующего комплекса для расчета гидрологического и термического режимов р. С.Сосьва.

- 1. Геометрические данные. На первом этапе расчетов задавался упрощенный вариант геометрических данных: число продольных сегментов-18, их ориентация в плане-фактическая, длины сегментов от 2.7км до 4.7км, при общей длине участка реки 65300м; слоев по вертикали-61 (глубина реки на г/п Сосьва-10.8м); ширины слоев заданы из фактического профиля поперечного сечения руслового канала в районе г/п Сосьва.

## **2. Результаты применения базового моделирующего комплекса для расчета гидрологического и термического режимов р. С.Сосьва.**

- 2. Начальные и граничные условия заданы по данным метеорологических (каждые 3 часа) и гидрологических (2 раза в сутки) наблюдений на м/с и г/п Сосьва и г/п Сартынья с 07.07 по 12.07.2003г.
- 3. Гидравлические параметры (коэффициенты придонного трения Шези, коэффициенты ослабления света и др.) заданы средними величинами из рекомендуемых диапазонов наблюдаемых параметров для субполярных рек.

## 2. Результаты применения базового моделирующего комплекса для расчета гидрологического и термического режимов р. С.Сосьва.

- Детальное сравнение результатов расчетов с данными гидрологических наблюдений показывают способность БМК воспроизводить качественно и количественно правильно тонкую структуру реальных полей скорости (в том числе формирование придонного пограничного слоя, уменьшение скоростей течения от входного створа к выходному).

## 2. Результаты применения базового моделирующего комплекса для расчета гидрологического и термического режимов р. С.Сосьва.

- Модель правильно описывает формирование фиксируемого наблюдениями дневного прогрева (рис.1) и ночного выхолаживания верхних слоев реки в малооблачные периоды. При этом фиксируется незначительное превышение (на  $0.1-0.3^{\circ}\text{C}$ ) расчетной температуры над наблюдаемой.

## 2. Результаты применения базового моделирующего комплекса для расчета гидрологического и термического режимов р. С.Сосьва.

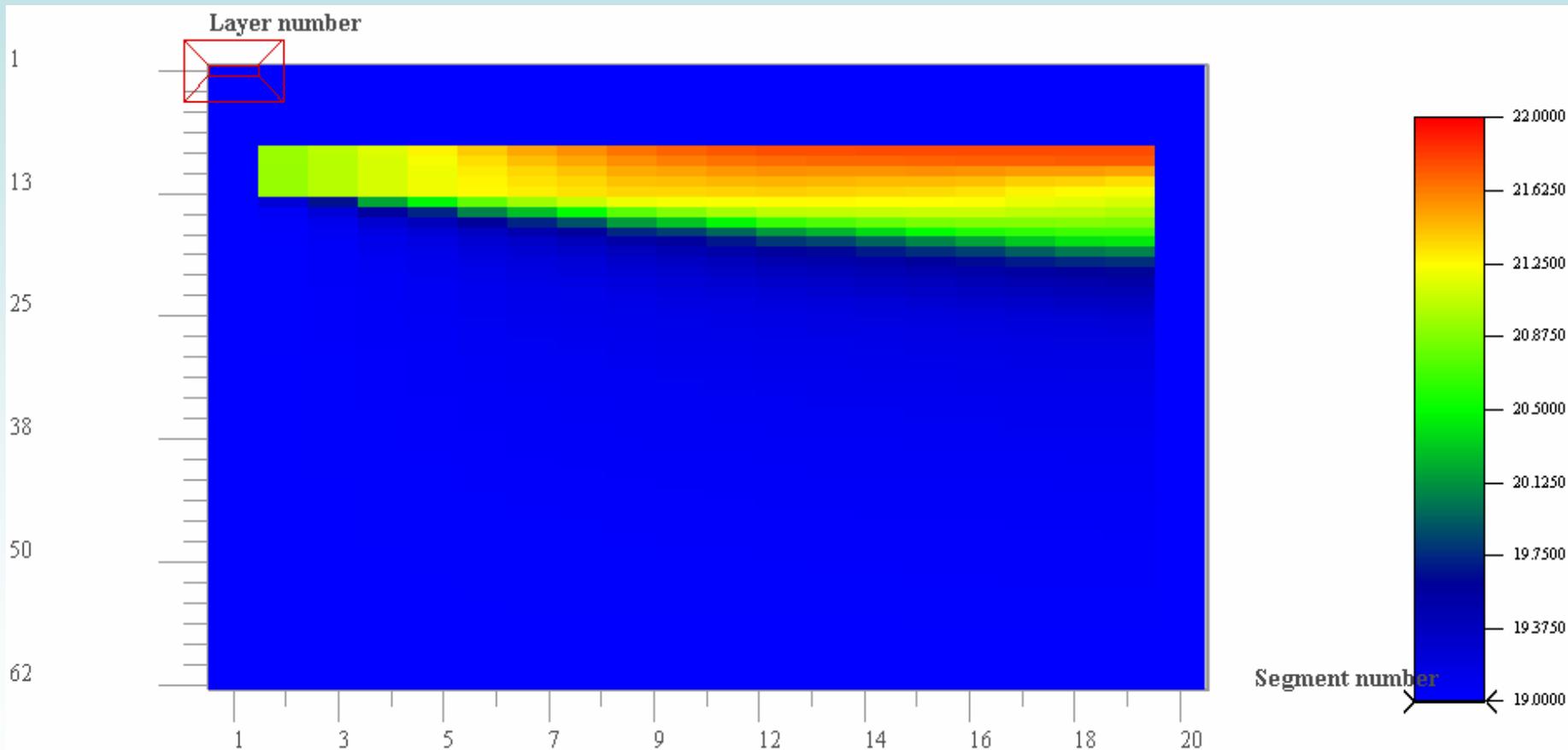


Рис. 1 Рассчитанное поле температуры на участке реки С. Сосьва в момент максимального суточного прогрева 8 июля 2003г.

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- Среди вероятных сценариев будущего промышленного освоения, уникальной по запасам полезных ископаемых, территории Приполярного Урала, реальным представляется вариант, связанный с проектированием и строительством здесь различных типов гидротехнических сооружений. Ниже излагаются результаты пилотного применения БМК для моделирования гидрологического и термического режимов и экосистемных показателей качества воды виртуального водохранилища, которое может образоваться в указанном субарктическом районе, например при строительстве ГЭС. В качестве рабочей гипотезы принято, что геометрическим и технологическим аналогом виртуального водохранилища может быть реальное и хорошо изученное водохранилище Дегрэй (США, Арканзас).

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- данные батиметрии (длина водохранилища-30км, число продольных сегментов-30, максимальная глубина на приплотинном участке-66м, разрешение по вертикали-2м), величины расхода воды и концентрации компонентов качества воды на входном створе и в зарегулированном режиме через плотину взяты в виде копии данных из модели водохранилища Дегрэй, ( координаты: 34° с.ш, 93° з.д).

### **3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне**

- гидрологические данные о температуре воды, начальной толщине льда и метеорологические данные соответствуют данным наблюдений в пос. Сосьва за 2003г. ( координаты: 62° с.ш, 63° в.д.).

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- Расчеты с моделями проводились в идентичных форматах файлов " ввода-вывода" на период с 3 марта по 22 декабря 2003 г. для виртуального водохранилища (далее-модель ND) и на тот же период 1980г для водохранилища Дегрэй ( модель RD).

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

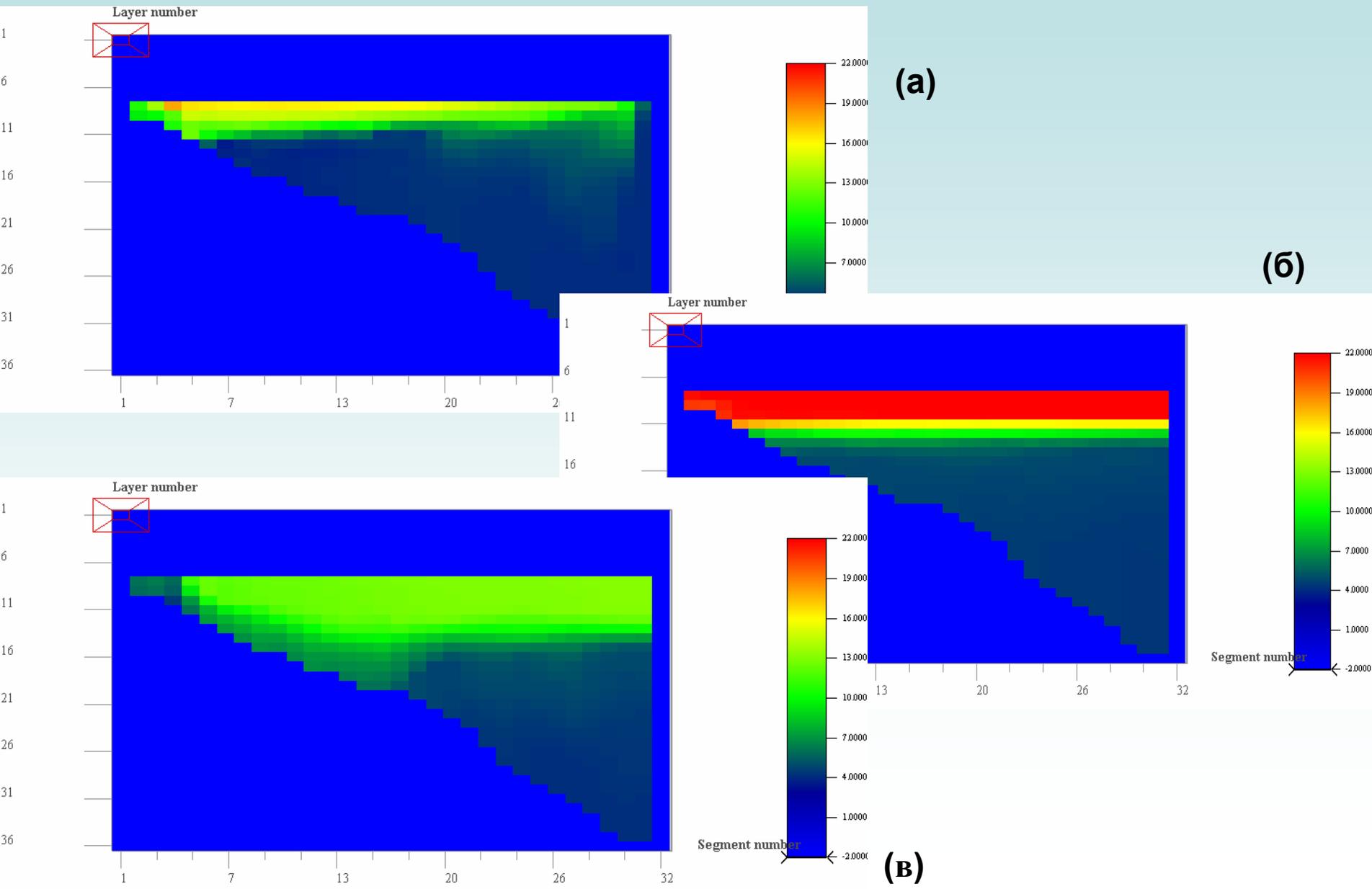
- В моделях ND и RD рассчитывались все характеристики гидродинамики и термического режима водохранилища (в модели ND рассчитывалась динамика ледового покрова, который фактически отсутствовал в модели RD), а также 19 основных и 23 производных переменных качества воды, в том числе: фитопланктон, основные биогены: соединения фосфора, азота, углерода и кремния, растворенный кислород, общая минерализация, рН, кишечная палочка.

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- В качестве иллюстрации для сопоставительного анализа результатов расчетов по моделям RD и ND приведены поля температуры воды на рис.2 (ND) и поля концентрации растворенного кислорода на рис.3 (RD) и 4 (ND).

# Рис.2 Поле температуры воды(С°).

Модель ND, даты : (а) – 31 мая, (б) – 1 августа, (в) – 30 сентября 2003г.



### **3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне**

- Особый интерес представляют результаты расчета характеристик ледового покрова по модели ND. Начальная толщина льда, равная 0.6м (данные по г/п Сосьва, начало марта 2003г), во второй половине апреля уменьшилась до 0.3м и в конце первой декады мая лед растаял на большей части акватории виртуального водохранилища.

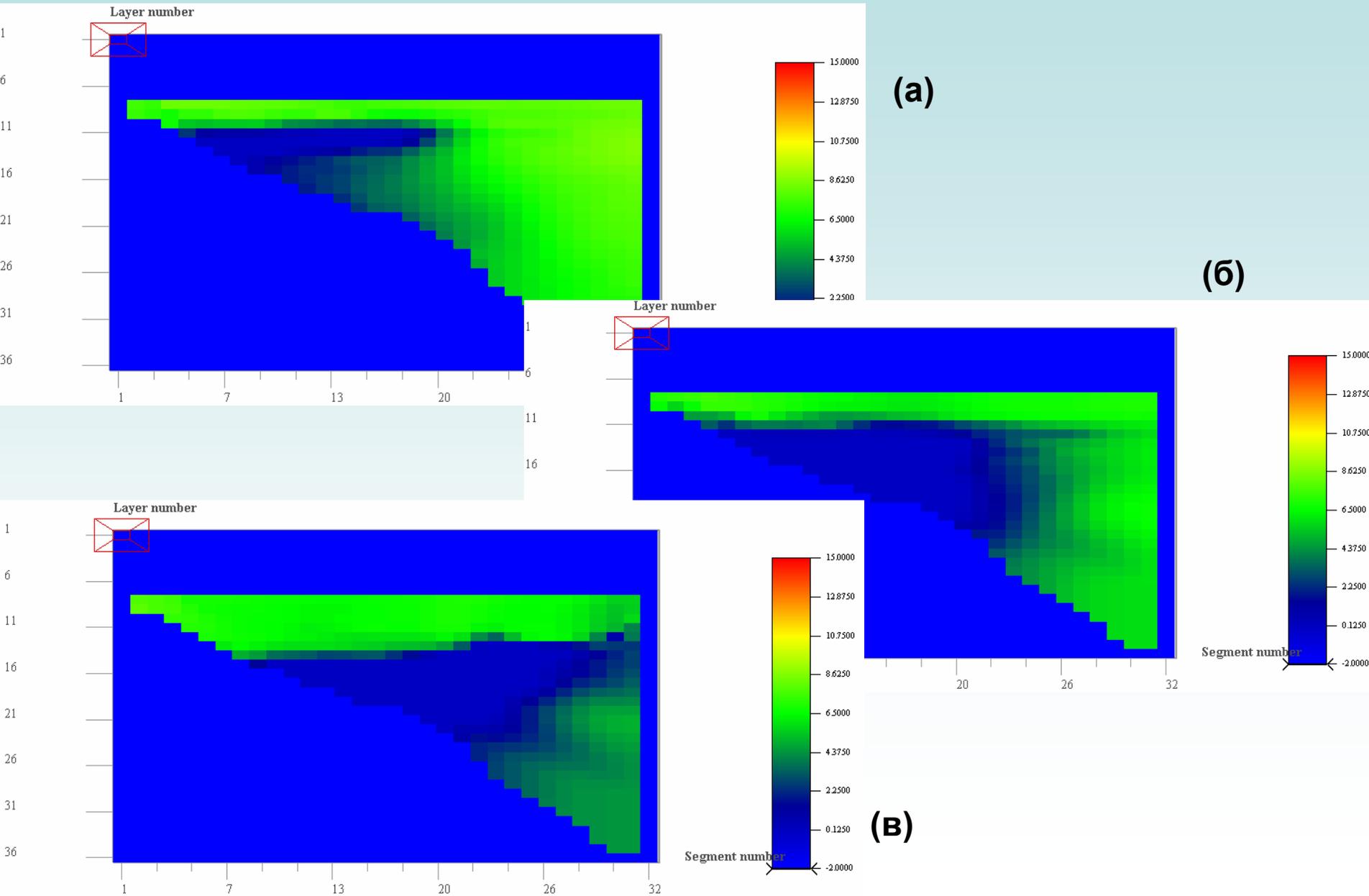
### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- Согласно расчетам по модели ND ледостав на виртуальном водохранилище начинается во второй половине октября. Толщина льда на 3 ноября 2003г на сегментах вблизи входного створа составляла 0.15м по модели ND и совпала с результатами измерений на г/п Сосьва 5 ноября 2003г.

### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- Важнейшим индикатором биохимического состояния водных экосистем является концентрация растворенного кислорода (РК). Как видно из рис. 3, модель RD хорошо воспроизводит, фактически наблюдаемую в этом хорошо прогретом водохранилище, обширную зону гипоксии (дефицита РК) в летне-осенний период.

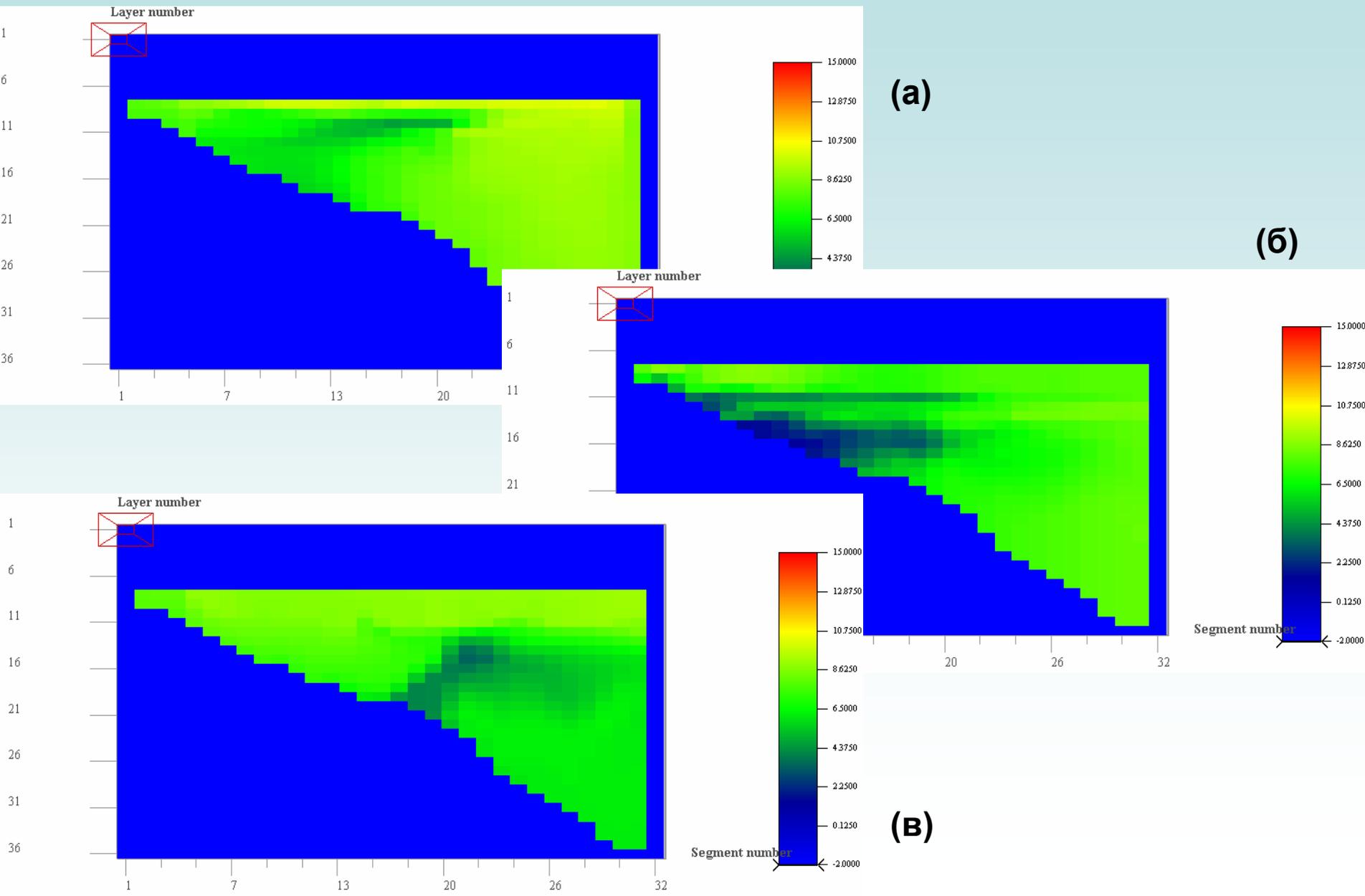
Рис.3. Поле концентрации растворенного кислорода(г/м<sup>3</sup>).  
Модель RD, даты : (а) – 31 мая, (б) – 1 августа,(в) – 30 сентября 1980г.



### 3. Результаты моделирования термодинамики и характеристик качества воды виртуального водохранилища в субарктической зоне

- Генетической причиной формирования такой зоны являются высокие значения седиментного потребления кислорода (СПК), связанного с бактериальным разложением органического вещества, накопленного в донных отложениях. В виртуальном водохранилище, как видно из сравнения рис. 3 и 4 ситуация с полями РК выглядит более оптимистично, хотя величины СПК были заданы теми же самыми, как в модели RD.

Рис.4. Поле концентрации растворенного кислорода(г/м<sup>3</sup>).  
Модель ND, даты : (а) – 31 мая, (б) – 1 августа,(в) – 30 сентября 2003г.



# Заключение

- Результаты работы по применению базового моделирующего комплекса к конкретным водным объектам, позволяют констатировать готовность лаборатории к выполнению в 2005г полномасштабной научно-технической разработки «Создание информационно-моделирующей системы гидродинамики, химических и биологических показателей качества поверхностных вод с учетом антропогенных нагрузок для решения прикладных задач водопользования, охраны водных и биологических ресурсов, экологического и гидротехнического проектирования и экспертизы».

# Заключение

## Три проблемы при создании ИМС

- Кадры (пользователи + модельеры)
- Экосистемные данные
- Консорциум команд разработчиков: 1. моделирование на площади водосбора (БМК для руслового канала + модель атмосферы + модель подземного и поверхностного стока); 2. разработка специализированной ГИС и информационного обеспечения для управления

# Заключение

Три проблемы для выхода на рынок наукоемкой продукции:

- Инструментарий (экосистемные наблюдения + ИМС)
- Интегрированная команда (междисциплинарность, пользователи + разработчики)
- Менеджемент