

**ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ
КРУПНЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ
ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ
КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Н.Н. Филатов

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

**XIX Научная школа
«Нелинейные волны - 2020»,
29 февраля - 6 марта 2020 г.**

План лекции

1. Почему на Школе предлагается рассказать о проблемах крупных внутренних водоемов.
2. Что происходит с озерами
3. Какие происходят изменения экосистем крупных внутренних водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов: Моделирование, эксперимент.

ВАЖНОСТЬ ВЕЛИКИХ ОЗЕР

ВОДЫ ОЗЕР – ИСТОЧНИКИ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.

ЛАДОЖСКОЕ И ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРА – ВАЖНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ АРТЕРИИ, СВЯЗЫВАЮЩИЕ КАСПИЙСКОЕ, БЕЛОЕ И БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ С АРКТИКОЙ.

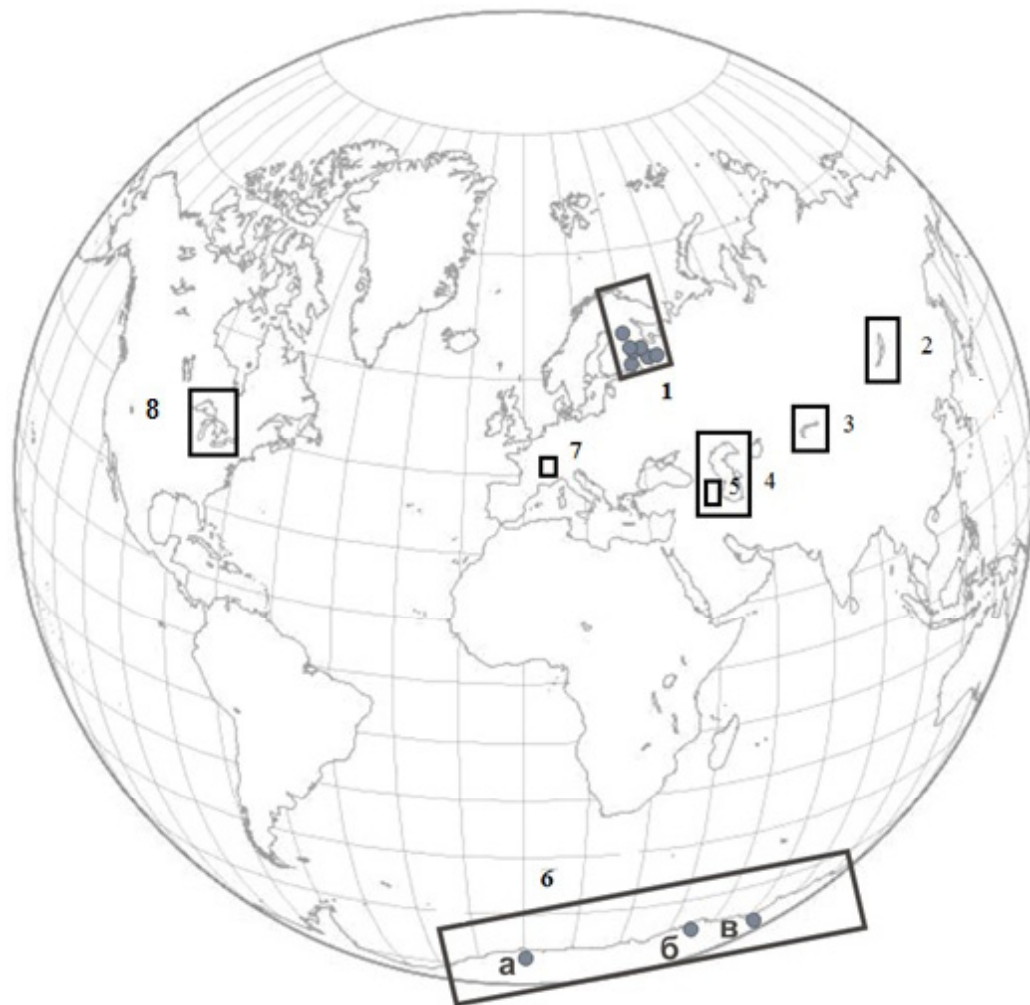
БАЙКАЛ, ОНЕЖСКОЕ, ИМАНДРА, ВЫГ, ВОДОХРАНИЛИЩА ВОЛЖСКОГО КАСКАДА - ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ.

ОЗЕРА – ОБЪЕКТЫ РЕКРЕАЦИИ, ИСТОЧНИКИ ВОДНЫХ И БИОРЕСУРСОВ.

ВЕЛИКИЕ ОЗЕРА И БЕЛОЕ МОРЕ – МОДЕЛЬНЫЕ ПОЛИГОНЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ (НЕЛИНЕННЫХ ВОЛН, АПВЕЛЛИНГОВ, ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, КОНВЕКЦИИ, А ТАКЖЕ КАЛИБРАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ);

ПРОВЕДЕНИЯ ПОДСПУТНИКОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Объекты комплексных исследований



1. Ладожское и Онежское озера.
Белое и Балтийское моря.
Озера Фенноскандии.
2. Байкал.
3. Балхаш.
4. Каспий
5. Севан.
6. 26 озер Восточной Антарктиды.
7. Женевское .
8. Великие американские озера.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ :

- В конце XX века была отмечена резкая деградация многих озерных экосистем из-за влияния человека (Арал, Балхаш, Каспий, Севан, Эри и др.).
- Проблемы антропогенного эвтрофирования озер одна из центральных. (**пояснить**).
- Потребовалось создание таких теорий, методов, которые смогли бы помочь, прогнозировать последствия в условиях воздействия климата и человека.
- *Уже в 1970-х Разработаны первые модели озерных экосистем (RAND corp. & MIT. 1977; Йоргенсен, Дания и др.; IIASA, Австрия), в СССР было несколько сильных групп, которые занимались моделированием водных объектов: ВЦ Москва (Н.Н. Моисеев); ВЦ СО АН СССР (Г.И.Марчук и др.), Ростов-на-Дону (Ворович и др.), 1977, СССР; Ин-т эволюционной физиологии и биохимии им. Сеченова*

Байкал

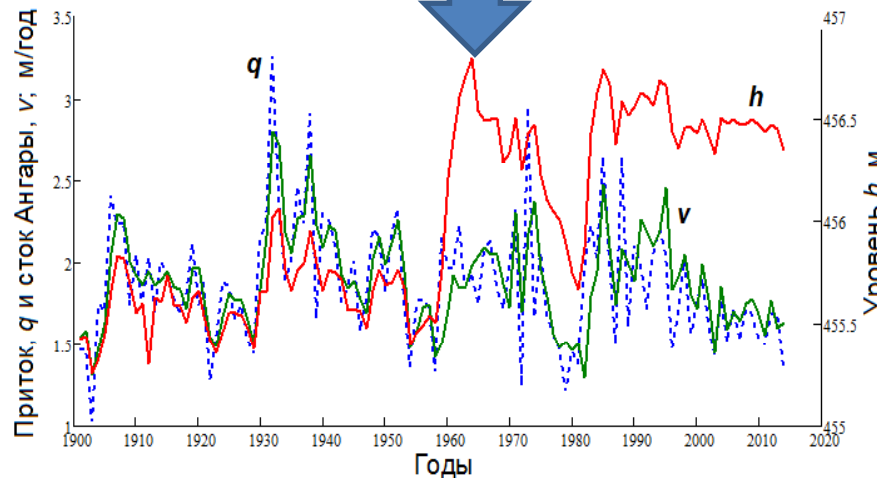
Проблемы: управления ресурсами без научного обоснования. Сбросы сточных вод в литоральную зону, без учета гидрофизических процессов, водообмена с открытым озером, Некорректный прогноз уровня воды. Эвтрофирование, *Spirogyra*, эндемики



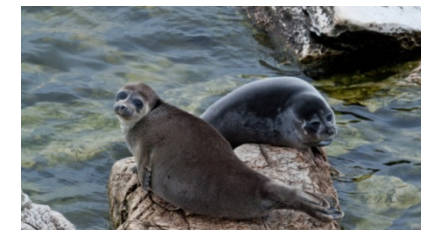
Spirogyra. Эвтрофирование



1 млн. туристов !



Уровень воды



Эндемики

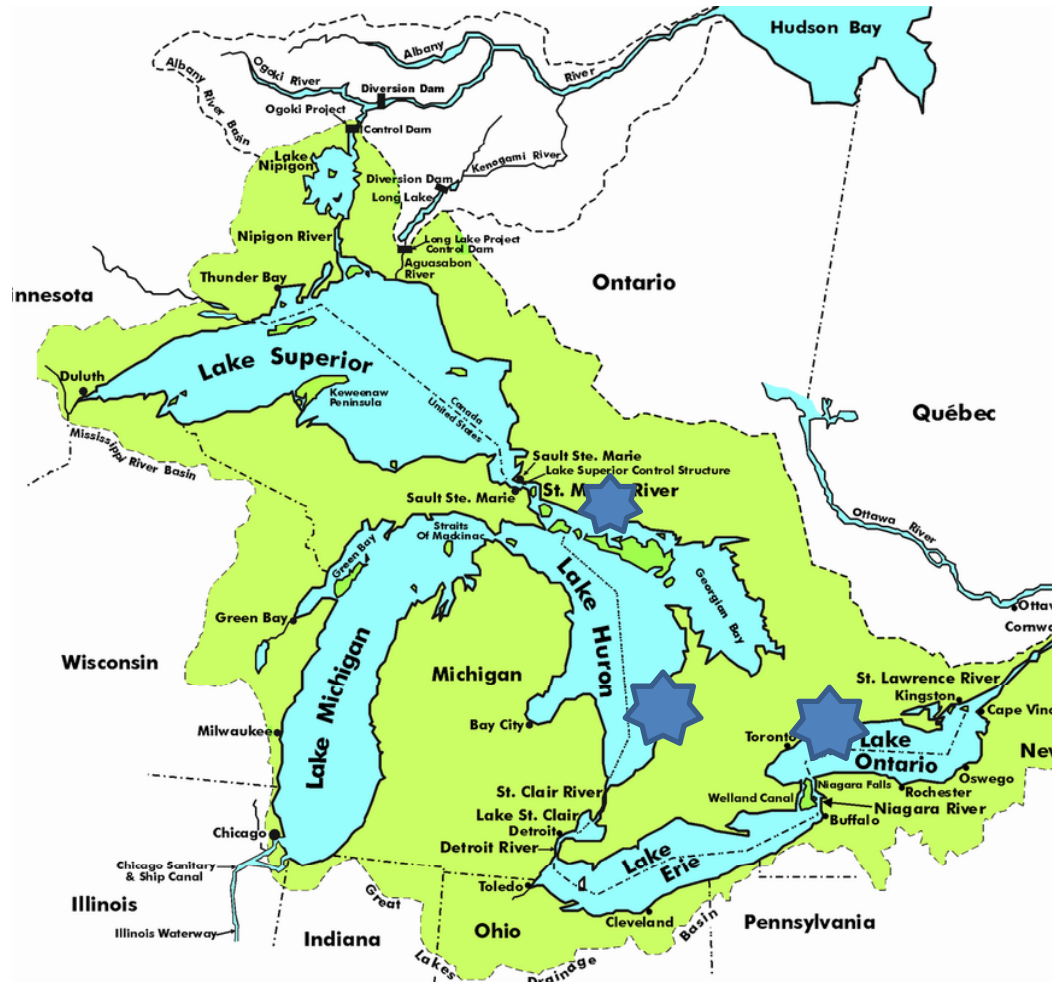


29 очистных - не работают в полной мере.

«БОЛЬШОЕ ОЗЕРО ВЕЛИКОЙ СТРАНЫ»

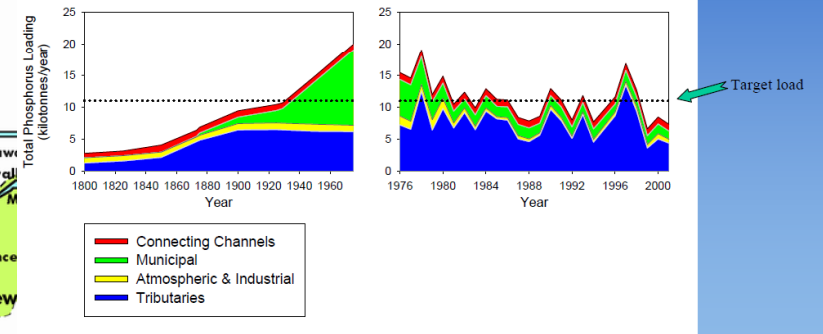
Великие американские озера

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Great_Lakes_1.PNG



оз. Эри –17 474 т Р/год ,
оз. Мичиган –6 350 т Р/год
оз. Гурон–4 860 т Р/год
оз. Верхнее –4205 т Р/год
оз. Онтарио -11 755 т Р/год

Оз. Ладожское - 2000 т Р/год



★ - Атомные станции на озерах

<http://www.nuclearsafety.gc.ca>

Водный путь для морских судов протяжённостью около 3000 км.

Водой пользуются более 250 городов, в которых проживает свыше 25 мл. Чел.

Биогенная нагрузка выше, чем на Ладоге и Бацикале. Имеется неск. атомных станций.

КАСПИЙ. Непрогнозируемый уровень воды. Ошибочный прогноз уровня воды в 1970-х годах и пресловутый Проект переброски стока Северных рек в Каспий.. Не учет термогидродинамических процессов при отделении дамбой залива Кара-Бога-Гол от Каспия, а затем уничтожение дамбы.

Проблемы управления ресурсами Каспия 5-ю государствами.



Белуга, не самый большой экз.



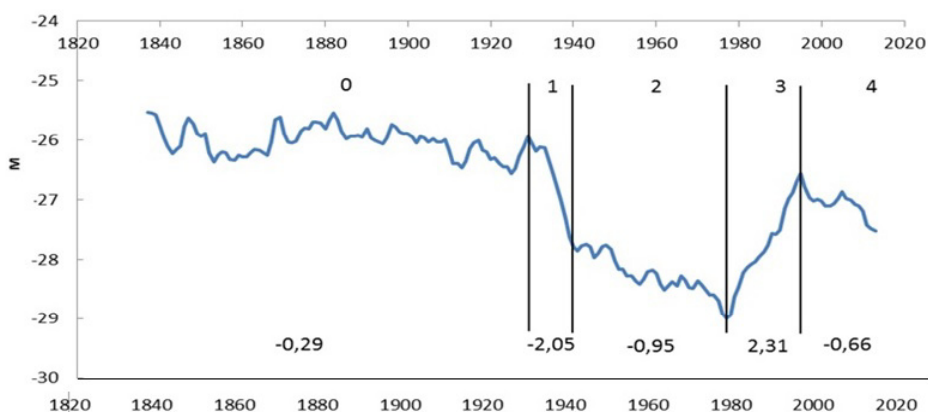
**Резкое падение уровня
С 1940 по 1979 гг.!**



**Газ, Нефть,
биоресурсы,
рекреация?**



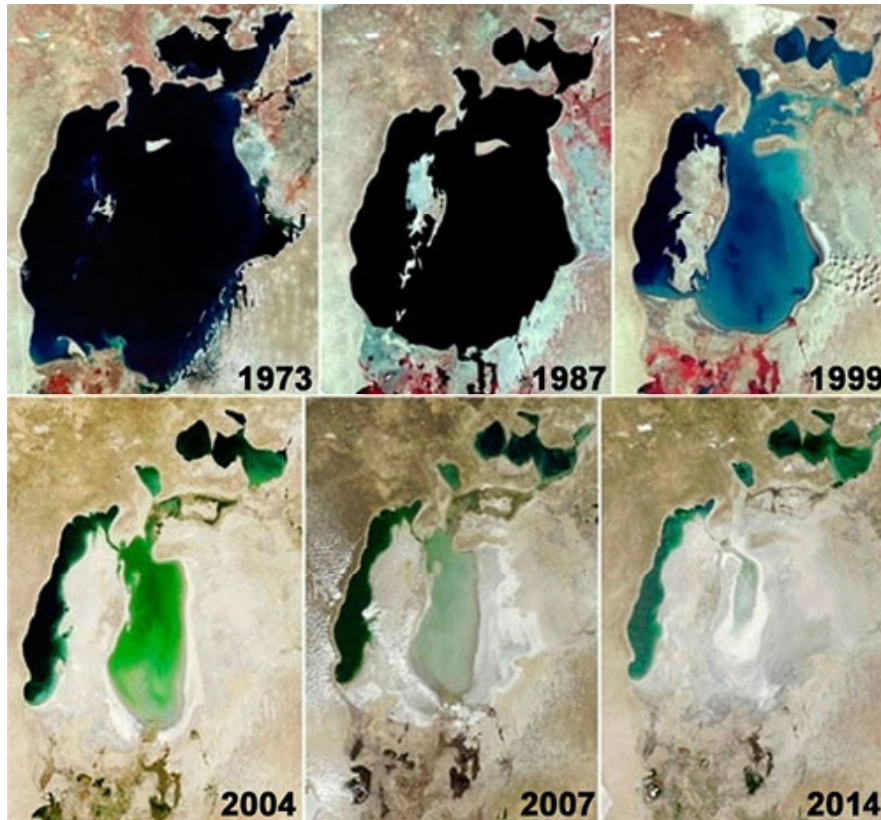
Схема перераспределения водных ресурсов Севера (из Белое море) с использованием ресурсов Ладожского и Онежского озер. Каспий - падение уровня с 1940 по 1979 гг.



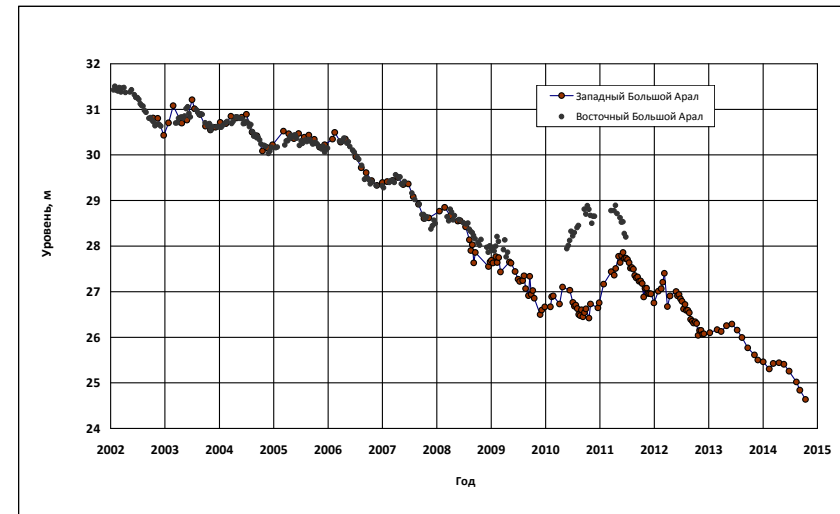
Первые модели экосистем Онежского озера созданы в ВЦ А СССР под руководством Н.Н.Моисеева в 1970-х годах.

Для Ладожского озера в ИНОЗ АН СССР Под рук. В.В.Меншуткина.

Аральское море. деградация экосистемы, распад моря на несколько частей, осолонение. Казахстан – восстановление Северного Каспия.



Катастрофическое изменение размеров моря.



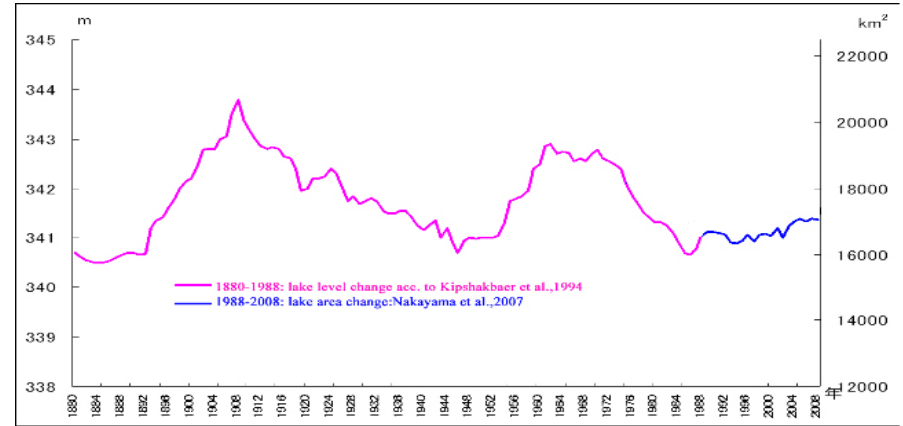
Падение уровня воды



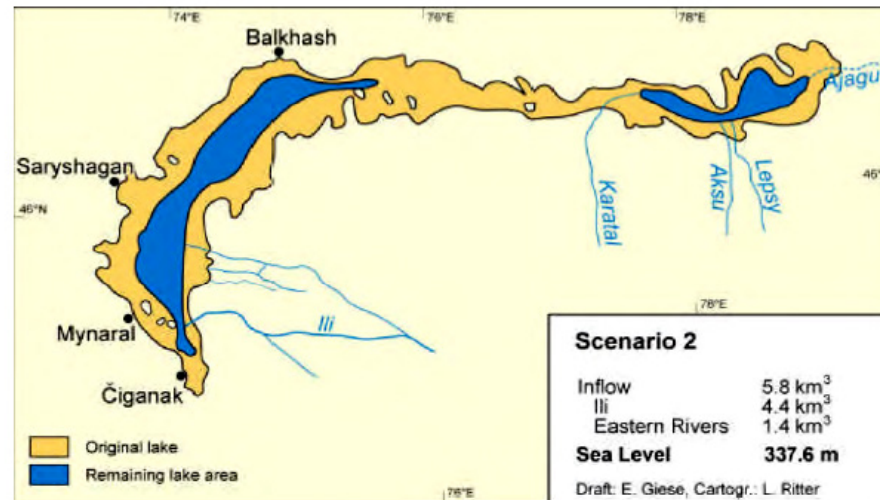
Флот в пустыне

По данным Н.В. Аладина

ОЗЕРО БАЛХАШ. Антропогенные изменения от ирригационной деятельности. Деградация экосистемы. Засоление восточной части озера



Уровень воды 1880-



Предложения: Прекратить водообмен Восточного и Западного Балхаша????? ..

Севан

80 годы XX века. Деградация экосистемы из-за падения уровня воды на 18 метров для нужд энергетики!

Эвтрофирование, деградация севанской форели, развитие вселенца – сига из Онежского озера.

В 1983 г. исследованиями доказано, что для улучшения состояние озера, необходимо улучшить водообмен, циркуляцию вод, для чего надо поднять уровень озера на 6 метров, для этого надо перебросить воды в Севан из Куры ит других рек, но....

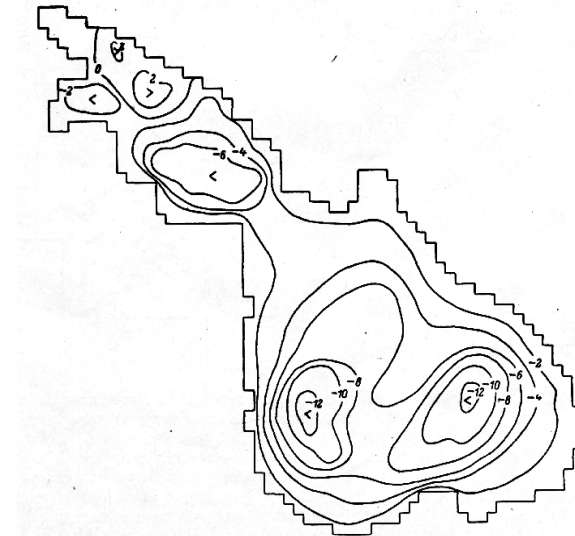
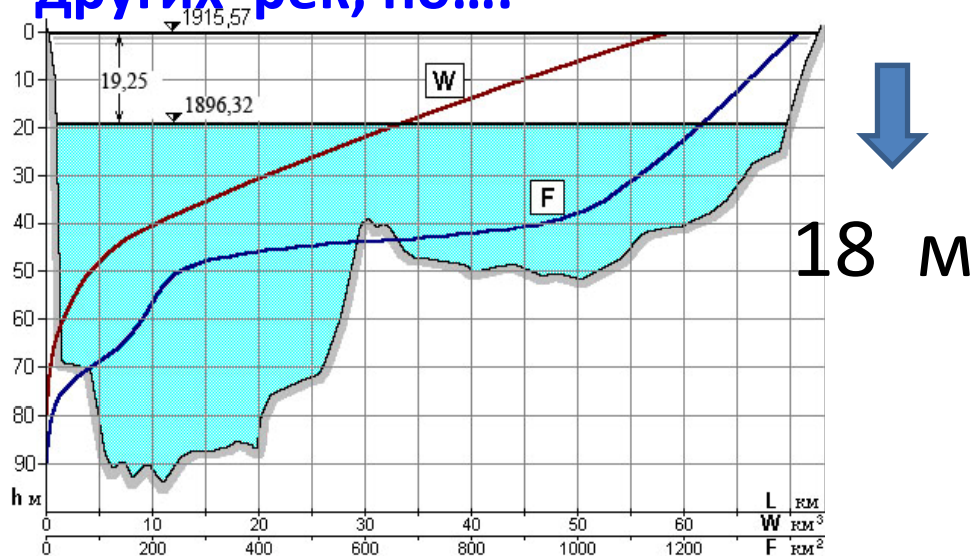
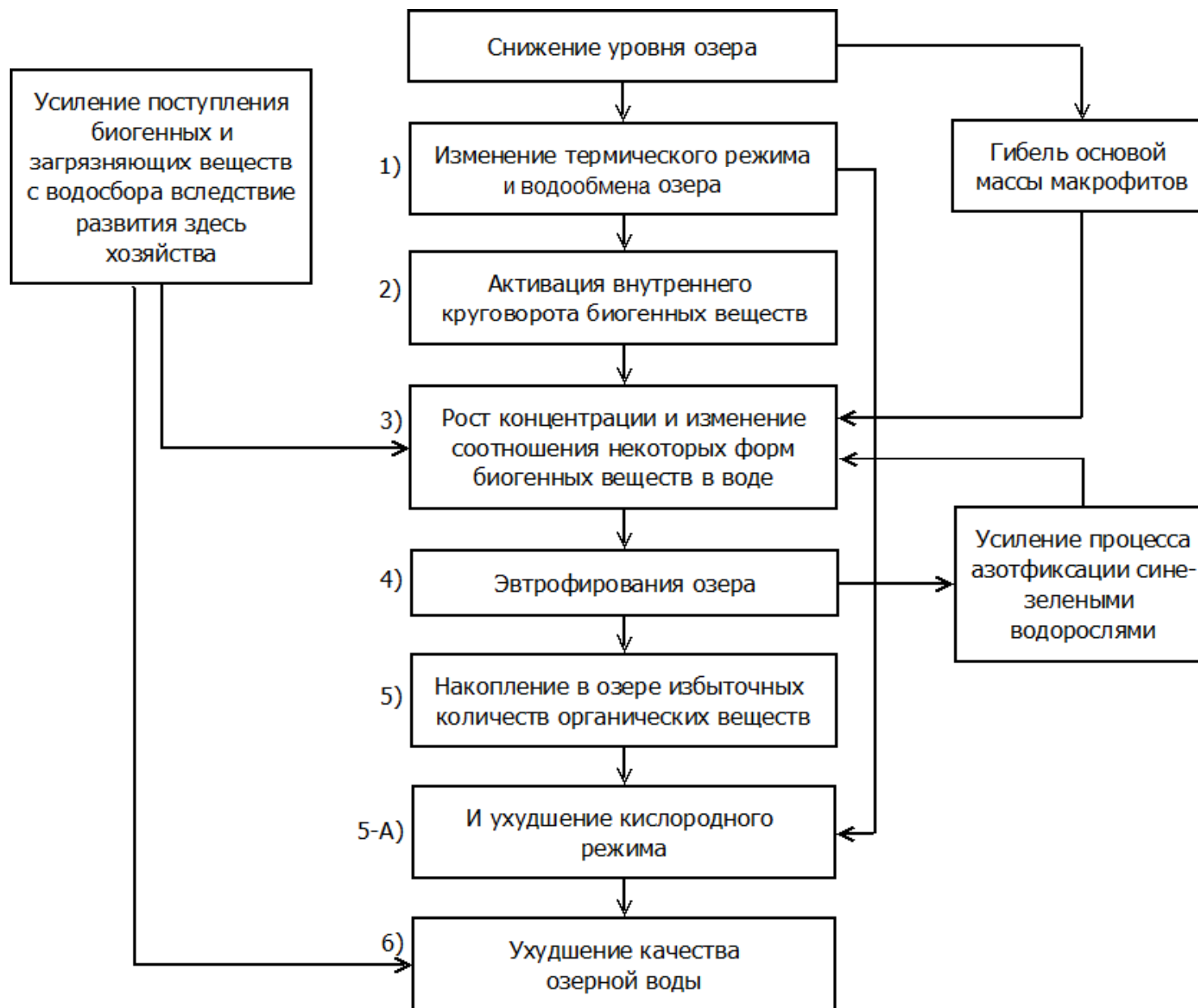
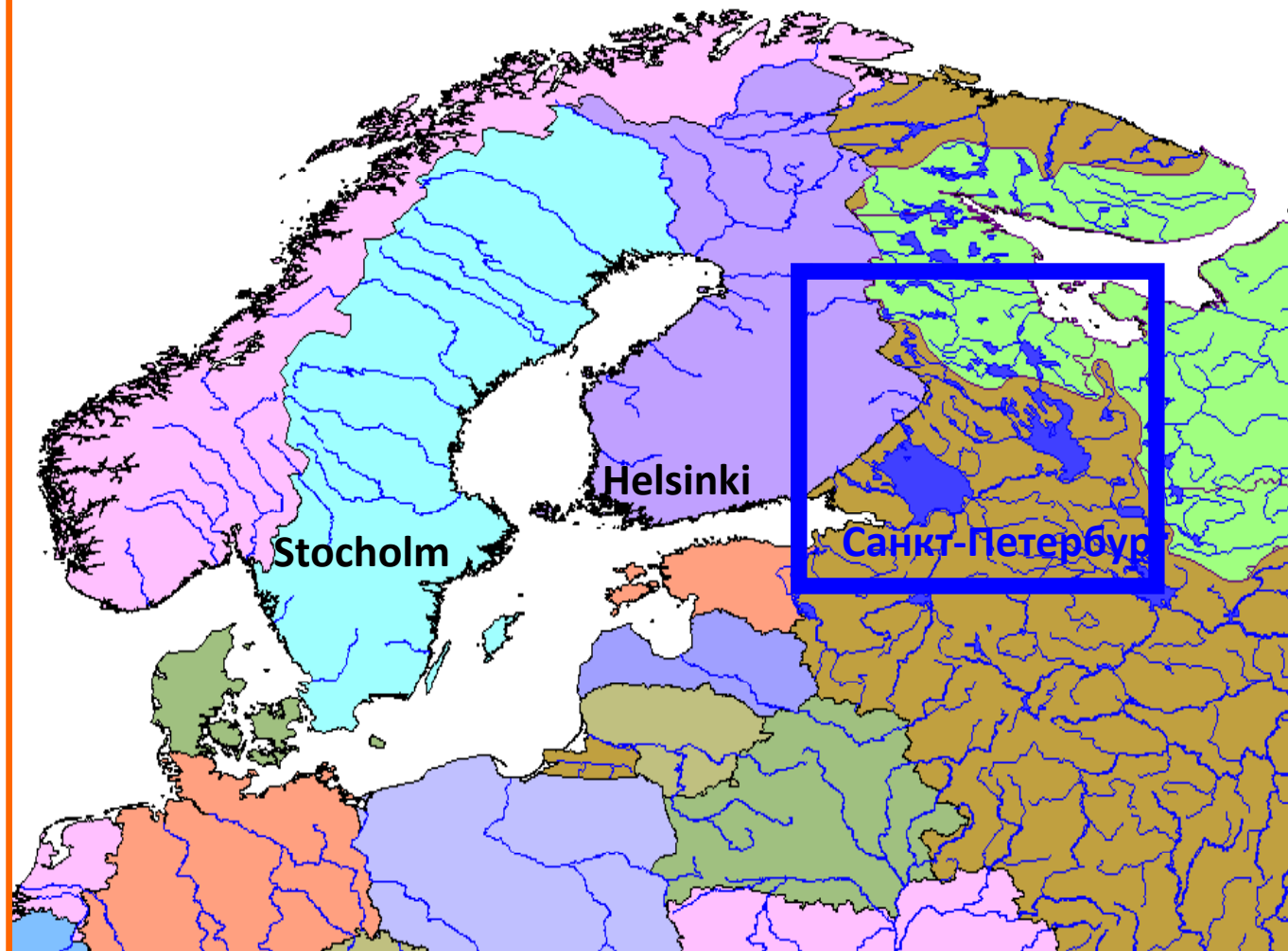


СХЕМА ПРОЦЕССОВ, КОТОРЫЕ ПРИВЕЛИ ИЗМЕНЕНИЮ КАЧЕСТВА ВОД ОЗ. СЕВАН



**ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ КРУПНЕЙШИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ
ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ.**

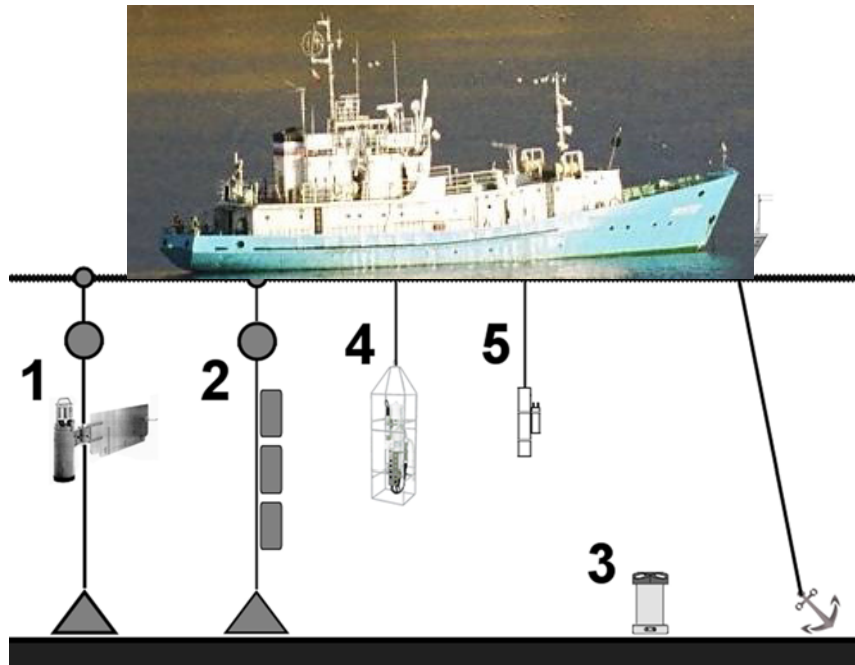


О ПРОБЛЕМАХ ВЕЛИКИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ: ЛАДОЖСКОГО и ОНЕЖСКОГО

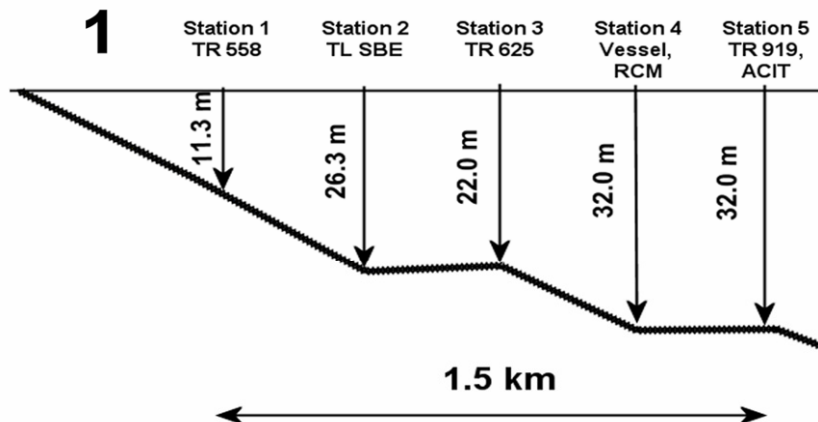
Значимость: Безальтернативные источники питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, городов, населенных пунктов Республики Карелия, Ленинградской и Вологодской областей.

- **Интенсивное эвтрофирование, загрязнение с 1970 гг. по 1991 г.**
- **Медленное восстановления экосистем озер после 1991 г.**
- **Необходимо выяснить причины медленного восстановления экосистем, оценить роль бактериопланктона, водных грибов, вселенцев - возможных причин медленного восстановления озер.**
- **Требуется выполнить оценку «допустимой нагрузки» на озера, ассимиляционного потенциала озер и решить задачу сохранения и рационального использования ресурсов озер.**
- **Необходимо совершенствование водного законодательства, которое не всегда способствует сохранению экосистем водоемов.**

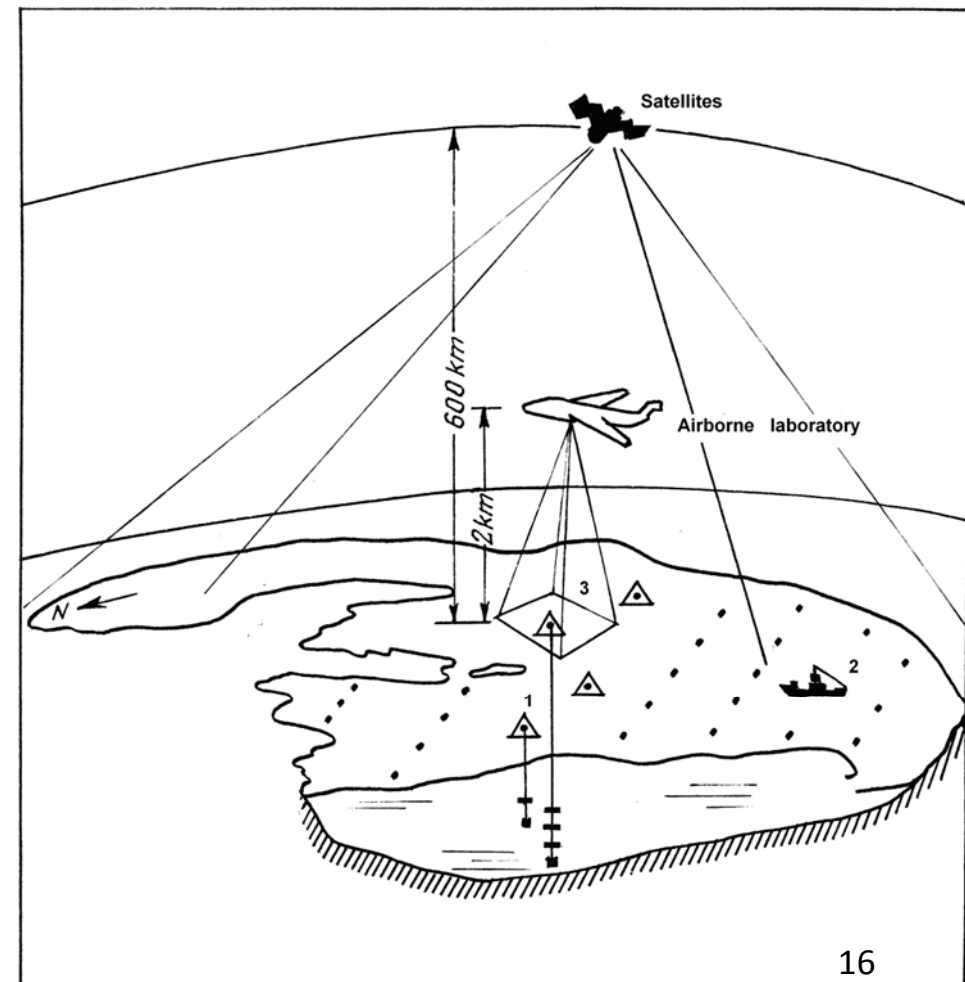
ИНФОРМАЦИОННУЮ ОСНОВУ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВИЛИ КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ОЗЕРАХ И БЕЛОМ МОРЕ



Разрез для изучения внутренних волн



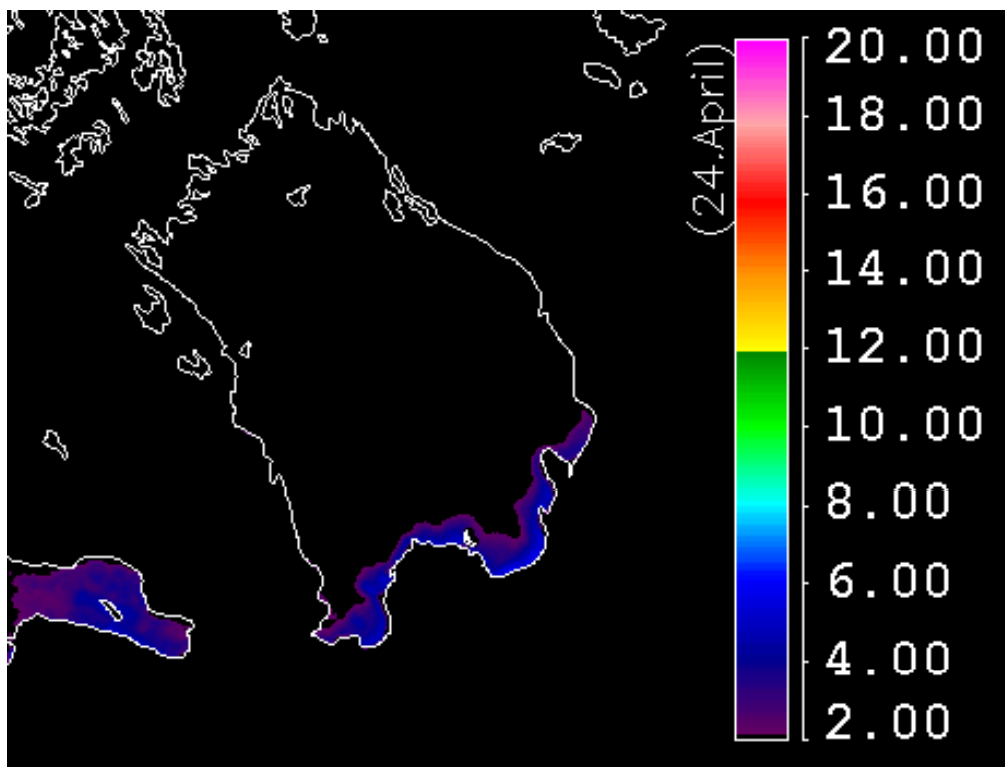
Многоуровневый эксперимент «ОНЕГО»



ШТОРМОВОЙ НАГОН на Онего в 2008 г

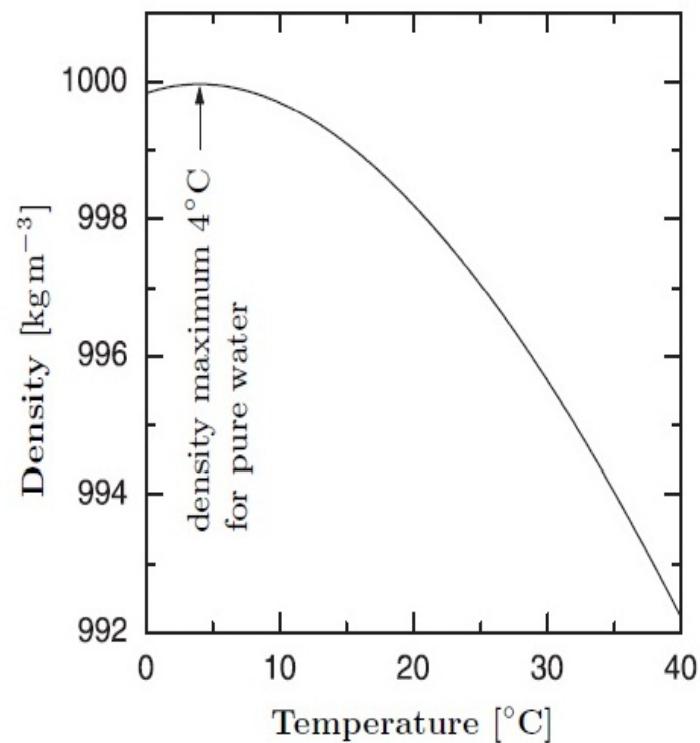


Формирование гидрофизических процессов зависит от аномальных свойств пресной воды. Генерация уникального явления – термобара.



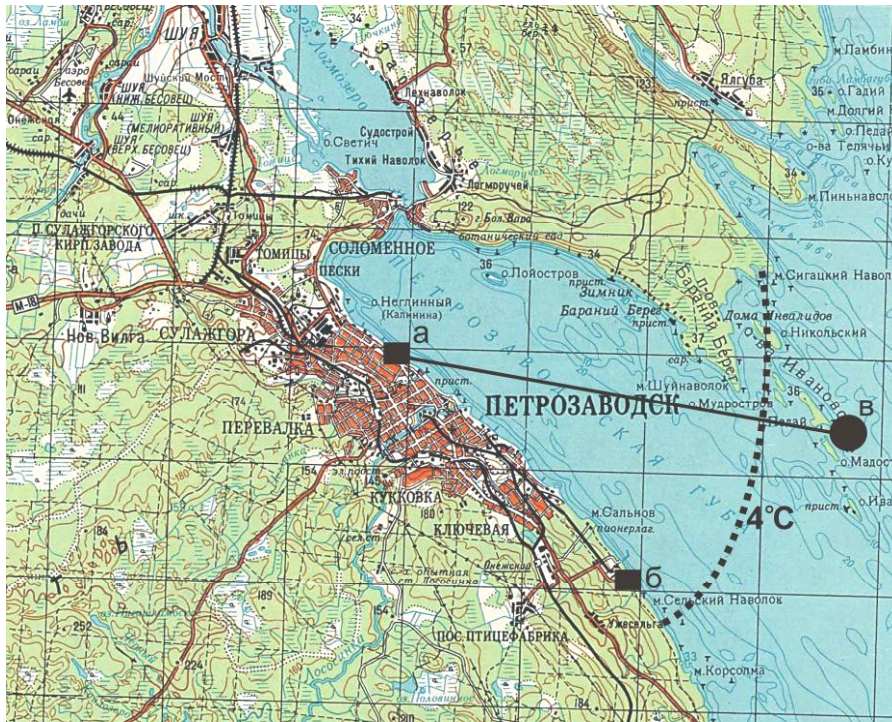
Сезонные изменения температуры пов.воды (ТПВ) Ладожского озера. Спутниковые данные.

ТПВ, С



Зависимость плотности пресных вод от температуры

Петрозаводская губа Онежского озера: 1) расположение водозабора (а) и положение весеннего термобара, рекомендованное положение нового водозабора б и в).



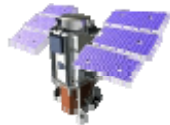
Но рекомендованное положение водозабора «бизнесу» не выгодно. Важно получить от государства 1 млрд. руб. на КОС, чем строить перспективный водозабор с учетом озерных процессов..



RADARSAT



EO-1



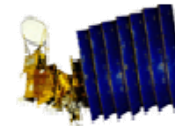
QUICK BIRD



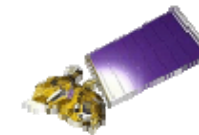
IKONOS



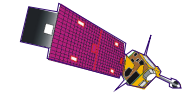
ENVISAT



AQUA



TERRA



GOES

Комплексные исследования глубоководных выпусков сточных вод с учетом гидрофизических процессов



AMERICAN ISLANDER



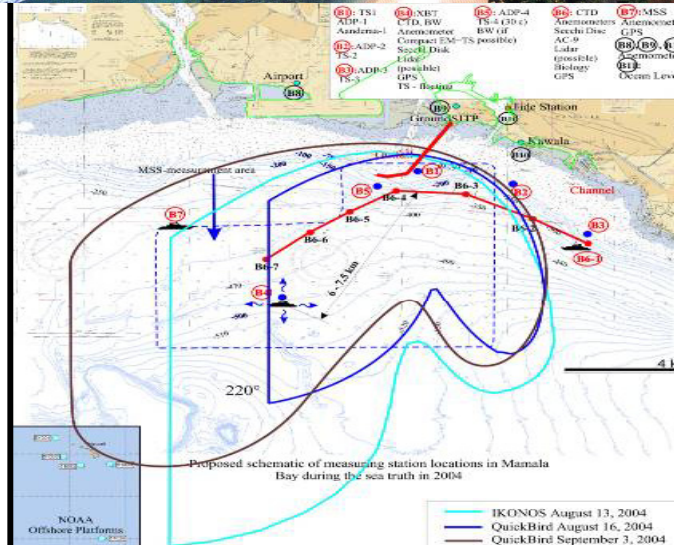
TOMI



MSS-measurements



Waikiki Beach HAWAII



KLAUS WYRTKI

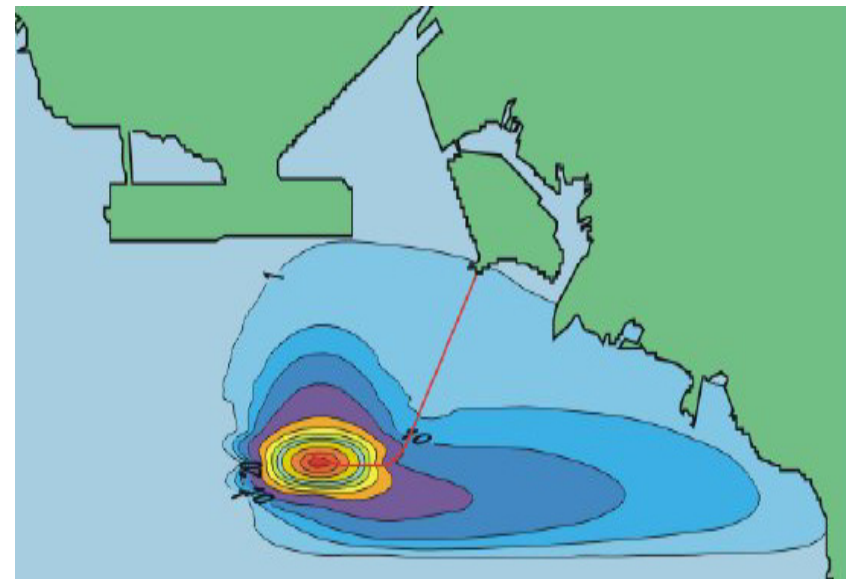
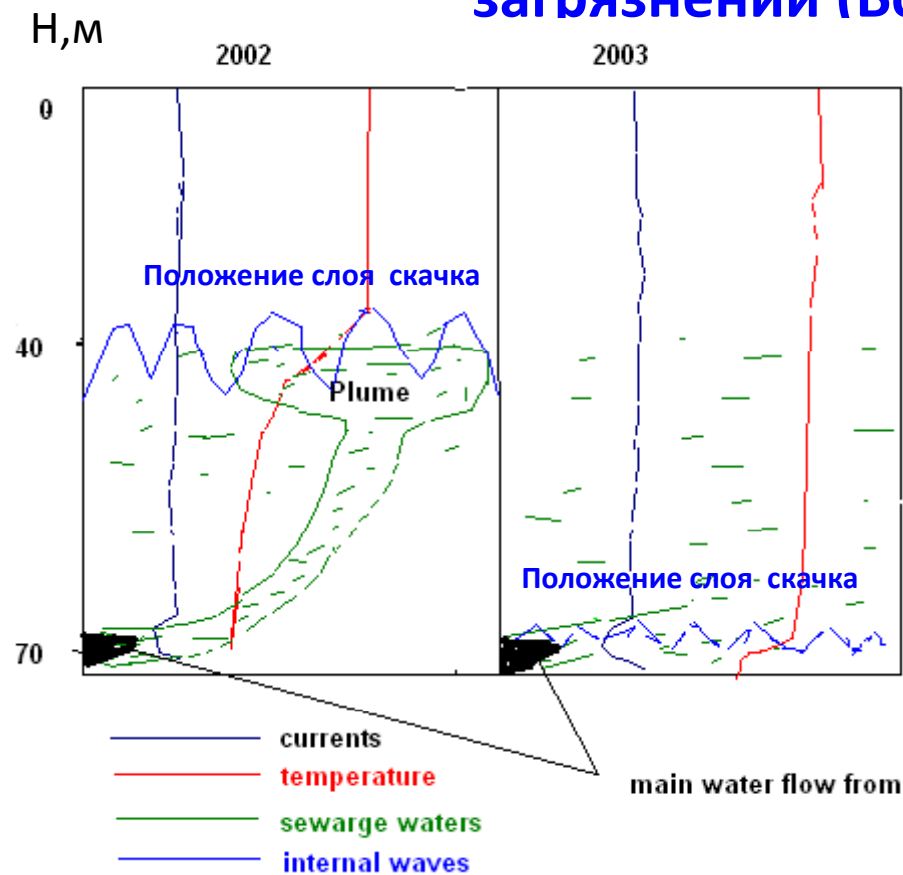


Wave Buoy Deployment



AC-9 Deployment

Выбор параметров глубоководных сбросов сточных вод в прибрежной зоне определяется с учетом гидрофизических процессов. Пример - прибрежная зона о. Оаху (Гавайские острова) для создания системы раннего оповещения о загрязнении (Бондур, Филатов, 2003)



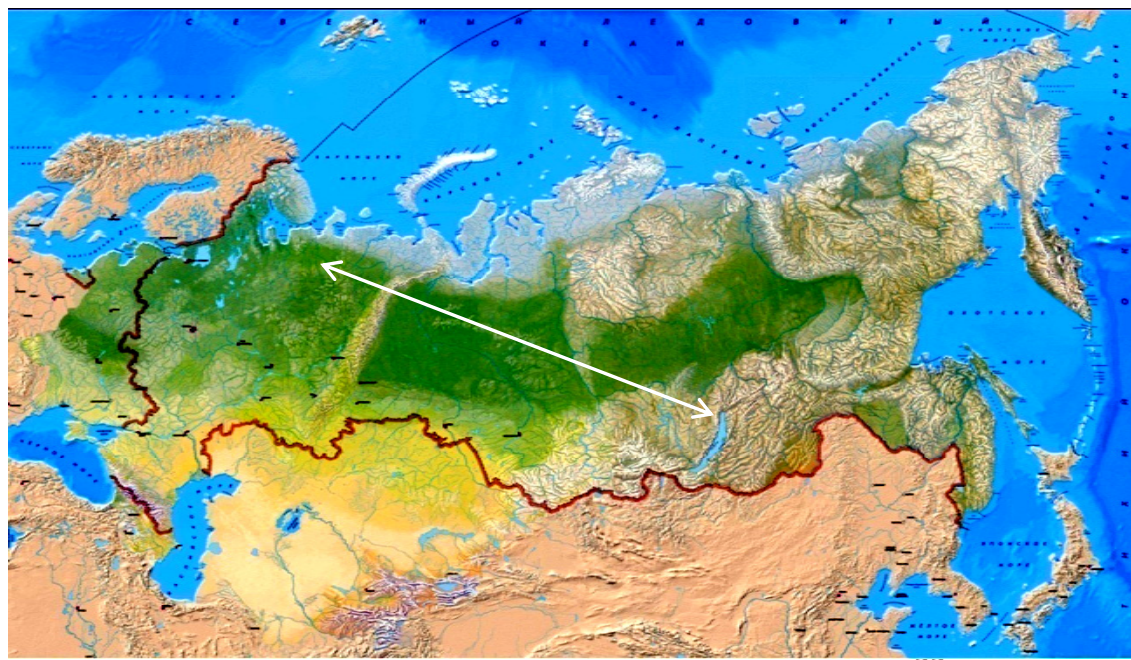
Пример выхода сточных вод г. Гонолулу при генерации ВВ на термоклине и их разрушении при выходе на мелководье

Проблемы - влияние вселенцев на изменения экосистем озер



Пути поступления вселенцев в озера

Более 80 лет назад в Верхнюю Волгу был интродуцирован рачок *змеленоис* из озера Байкал. Лозунг – «Зарыбляйте водоемы!»



КРУПНЫЕ (ВЕЛИКИЕ) , МАЛЫЕ ОЗЕРА

- *С точки зрения геофизической гидродинамики для классификации используют радиус деформации Россби $R = c / f$, и число Баргера.*
- *В соответствии с ним Ладога и Онега - очень большие или великие, как и Американские великие озера как и Байкал, так как бароклинный радиус деформации Россби ($R < L$) намного меньше, чем характерные горизонтальные размеры озер.*



Масштабы движений в озерах

**Характерные
Параметры движений
в океане и
крупных озерах.**

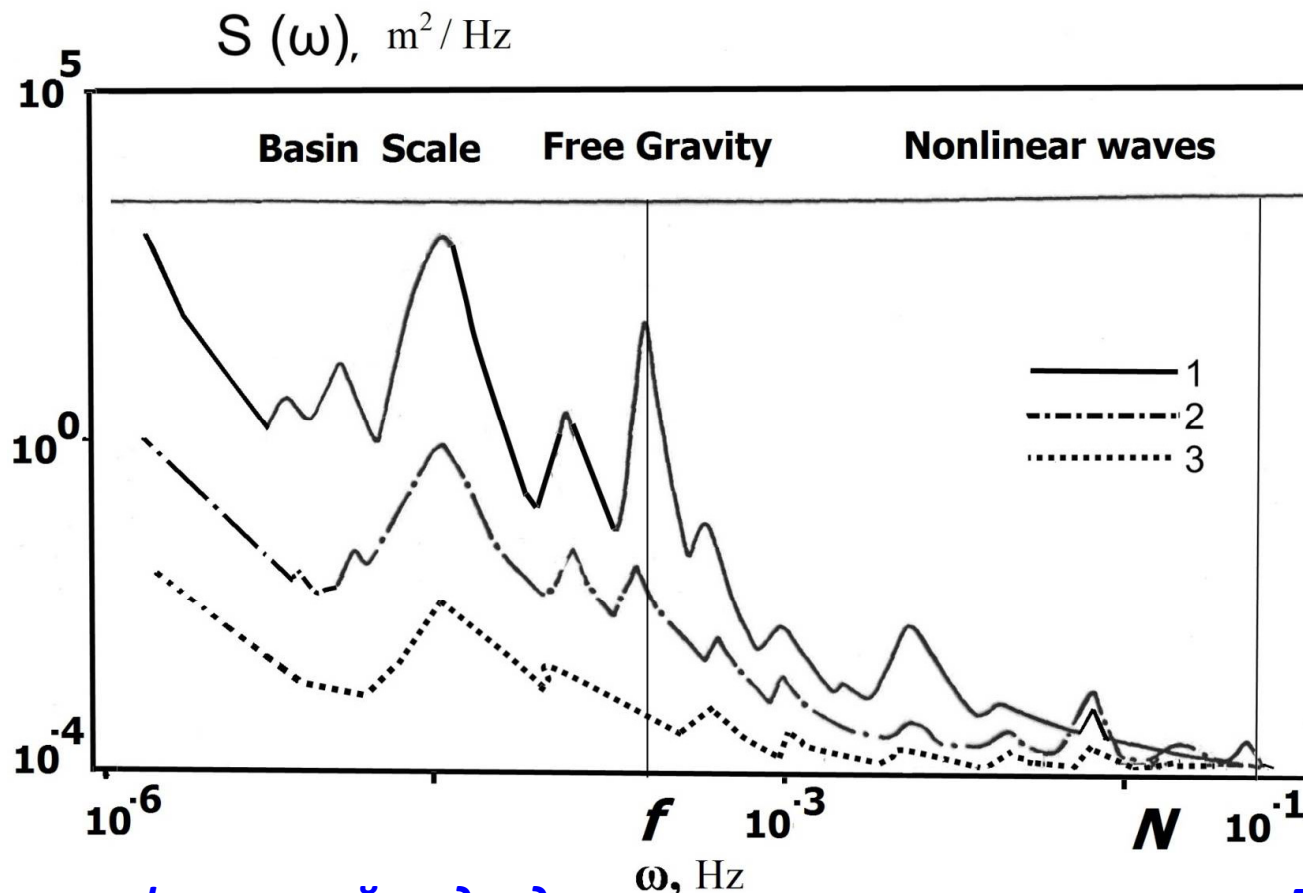
**О применимости
моделей
термогидродинамики
океана для
стратифицированных
озер.**

**Озеро как модель
..**

Процесс, явление	океан, L = 10³ км, H = 4·10³ м	глубокие озе-ра, L = 10² км, H =10² м
Планетарные волны Россби	+ ($\lambda = 10^5$ м, $V_{обр} = 50$ см/с)	-
Инерционно-гравитационные волны	+	+
Волны Кельвина	+ ($V_{\phi} = 10$ см/с)	+ ($V_{\phi} = 10$ см/с)
Топографические волны	+	+
Стоячие волны (сейши)	+ ($\lambda = 10^3$ км на экваторе)	+ ($\lambda = 10^2$ км)
Акустические волны	+	+
Капиллярные и гравитационные поверхностные волны	+	+
Приливные движения	+ ($V = 15$ см/с)	-
Синоптические вихри	+ ($V_{обр} = 150-200$ см/с)	+ ($V_{обр} = 20$ см/с)
Постоянные струйные течения, охватывающие водоем	+ ($V = 50$ см/с)	+ ($V = 10$ см/с)
Мелкомасштабная турбулентность, Микроструктура	+	+ (нет механизма двойной диффузии)
Стратификация	+	+ (нет постоянного термоклина)
Фронты	+	+
Прибрежный апвеллинг	+	+
Нелинейные ВВ, Солитоны	+ ($V_{\phi} = 1$ см/с)	+ ($V_{\phi} = 1$ см/с)

Типичные спектры движений в озерах Мира:

- 1) Великие, крупнейшие озера Мира $R_R \ll L$;
- 2) Озера средних размеров, $R_R \geq L$.
- 3) Относительно малые озера, ($R_R \geq L$), (Filatov, 1991)

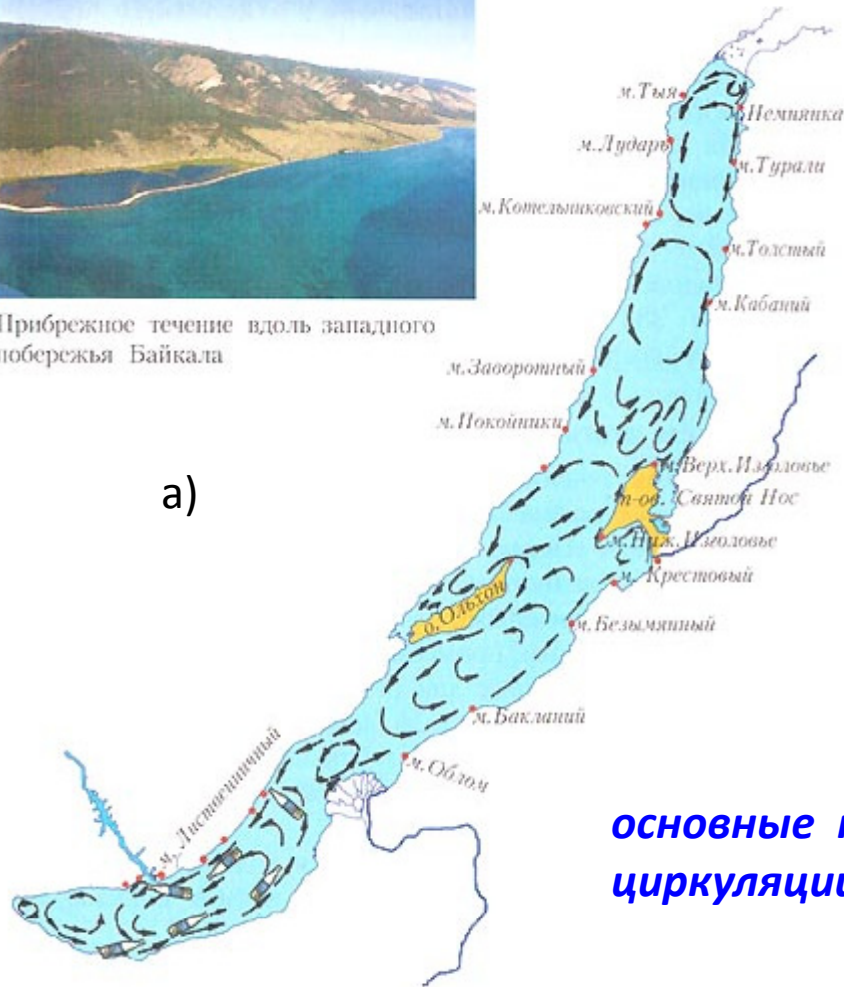


С точки зрения геофизической гидродинамики есть строгие критерии. В частности, радиус деформации Россби $R = c / f$, и число Баргера. В соответствии с этими критериями Ладога и Онега - очень большие или великие, так как бароклинный радиус деформации Россби ($R < L$) намного меньше, чем характерные горизонтальные размеры озер.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД в озерах Байкал (а) и ОНЕЖСКОМ (б) В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД



Прибрежное течение вдоль западного побережья Байкала



a)



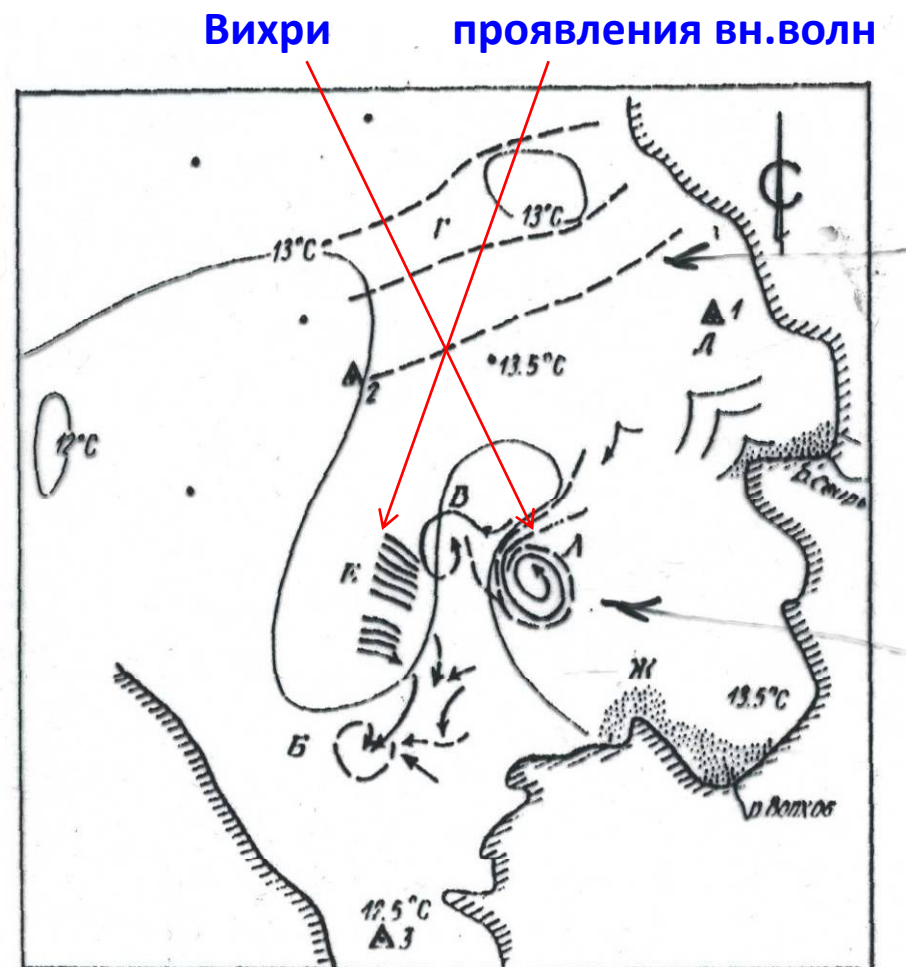
b)

основные причины генерации крупномасштабной циркуляции вод в крупных озерах.

Проявление мезомасштабных вихрей, грибовидных образований, волновых движений в Ладожском озера



Спутниковый снимок

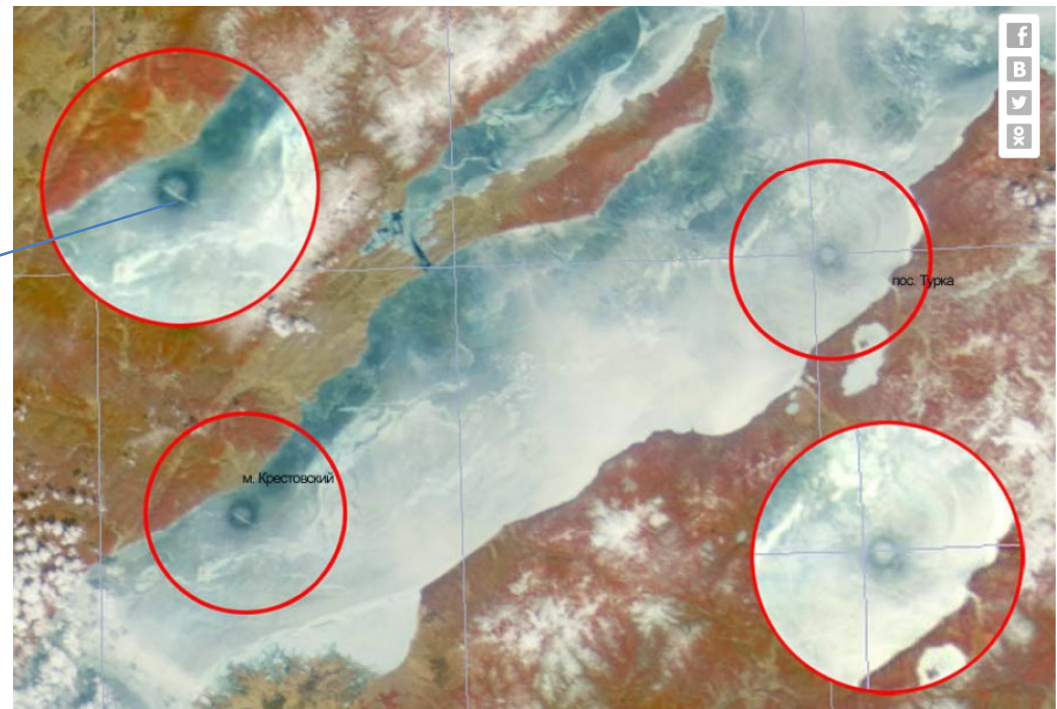
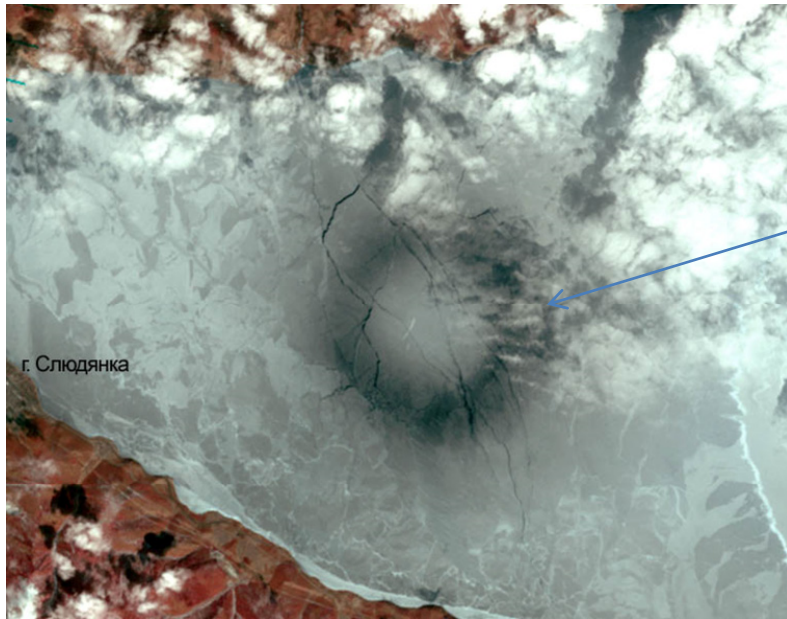


дешифрированный снимок

«Кольца» на льду оз. Байкал

100 км

10 км.



МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ТОЧНО НЕ ОПРЕДЕЛЕННЫ. Гипотезы:

1. **ЗА СЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:** Совместного эффекта прибрежных течений, рельефа дна, сейш, влияния стока рек?
2. ХИМИЧЕСКОЕ – ВЫХОД МЕТАНА НА ПОВЕРХНОСТЬ ОЗЕРА?
3. БИОЛОГИЧЕСКИЕ процессы ?

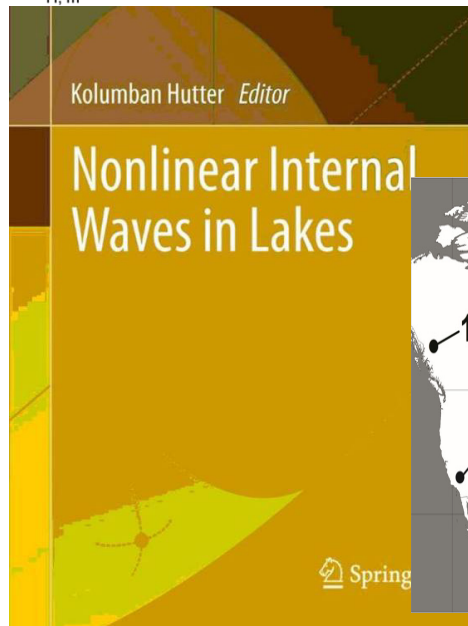
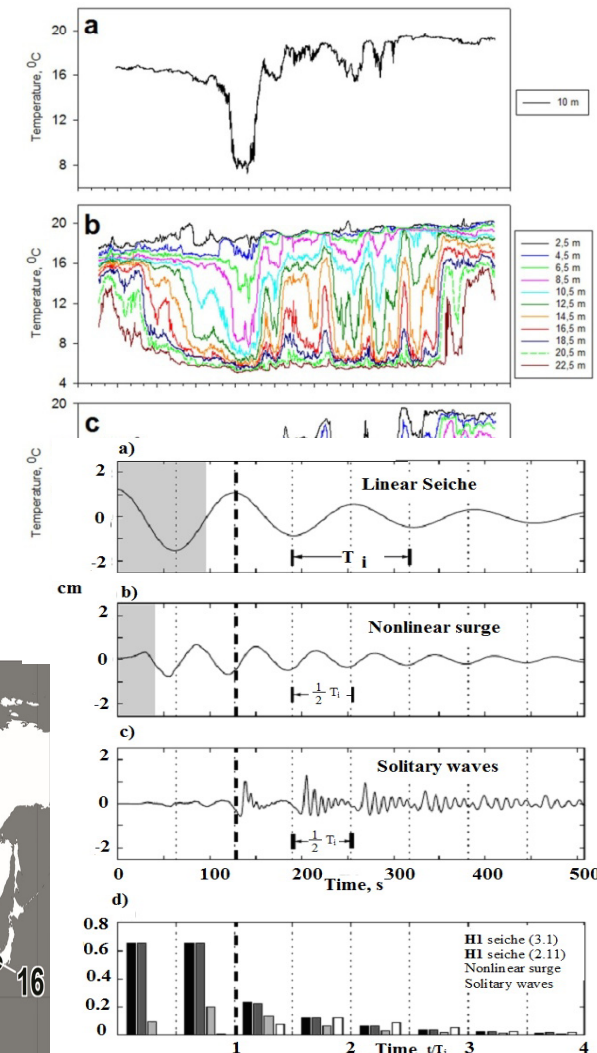
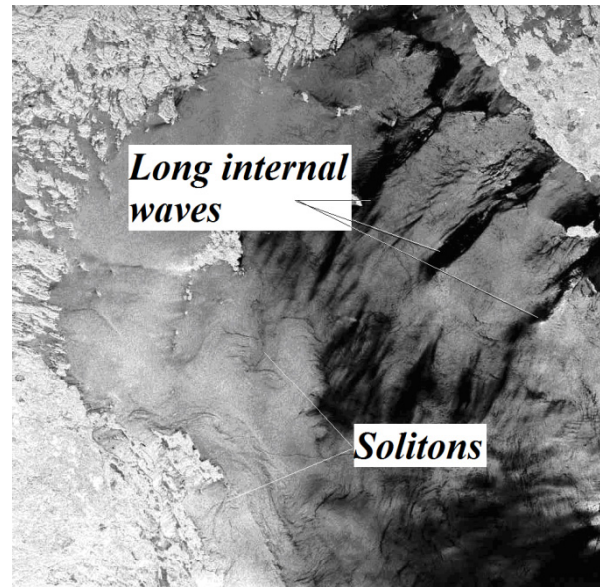
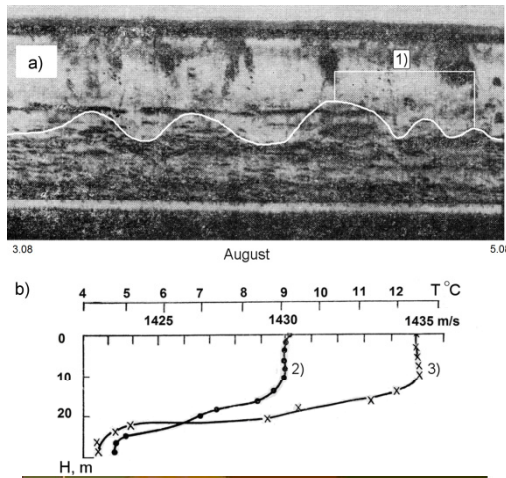
ВОПРОСЫ:

Почему формируется антициклонический вихрь подо льдом, связано ли такое вихреобразование с каньонным углублением рельефа дна и почему таяние льда происходит именно по кольцу?

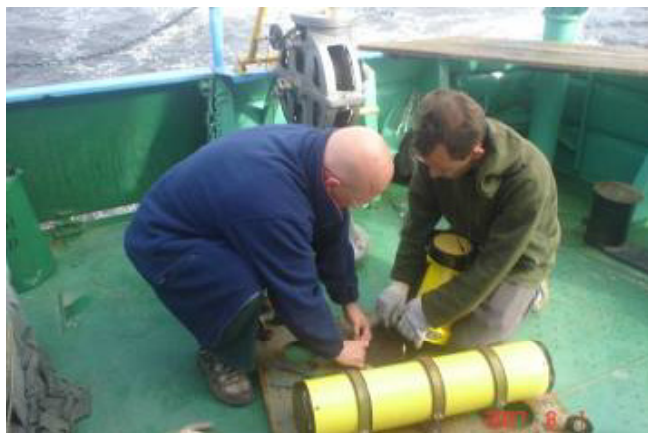
В.Н. Зырянов, 2019; Kouraev et al., Limnology and Oceanography, 2016

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ: Генерация, разрушение, взаимодействие.

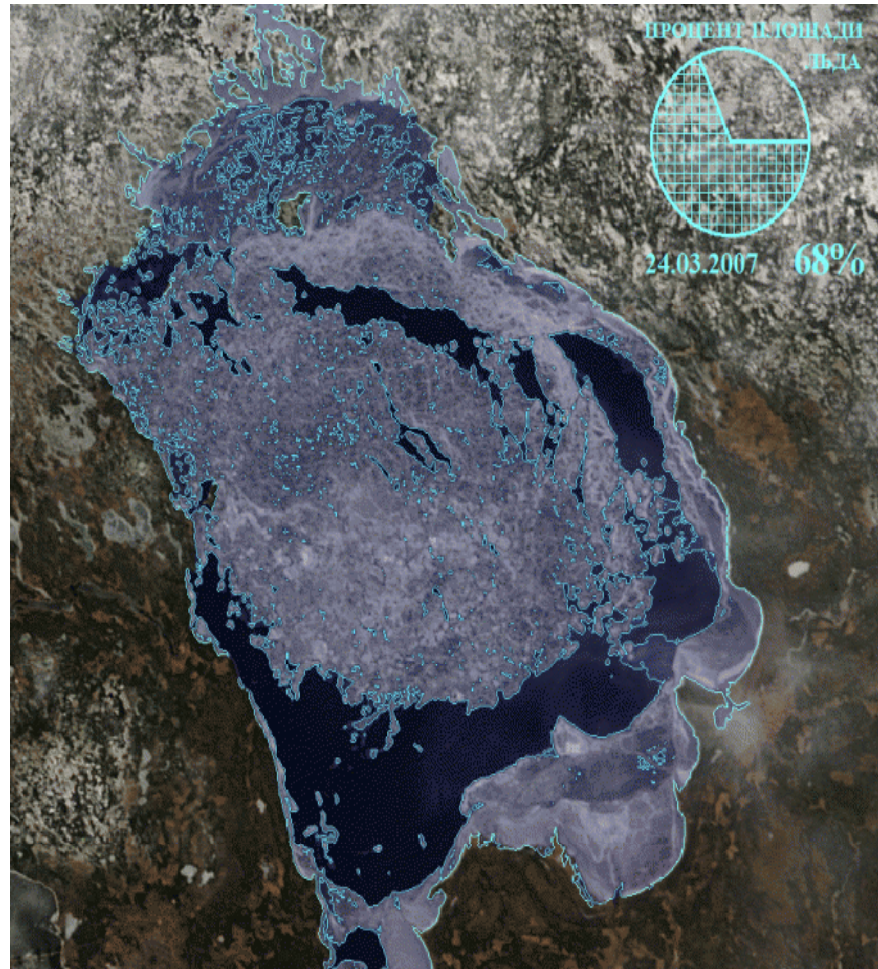
Грант ИНТАС (Германия, Россия, Украина, Англия). 2010-2012 гг.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА БОРТУ НИС «ЭКОЛОГ»



Динамика ледового покрова Ладожского и Онежского озер по спутниковым данным



Ладога



Онега

Процент покрытия льдом акватории

ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР

- Проведение наблюдений, полевых экспериментов, мониторинга, возможно только в отношении ограниченного числа характеристик системы озер.**
- Экосистемы озер не является полностью наблюдаемой системой.**
- С помощью математических моделей возможно получить сведения о состоянии таких элементов экологической системы озера, которые недоступны для непосредственного наблюдения, а также определить воздействия на систему.**

- Традиционный путь построения математических моделей термогидродинамических процессов и явлений озер, как правило, состоит в формулировании в виде систем дифференциальных уравнений физических законов, составляющих основу изучаемых процессов и явлений.
- Модели для описания процессов и явлений живой природы (биоты), основаны не на физических законах (в части, касающейся трансформации субстанций), и не на уравнениях химических реакций.
- Основу уравнений экологических моделей озер составляют различные эмпирические закономерности, установленные в процессе изучения и обработки результатов наблюдений.

Основные проблемы, которые решались с использованием 3-D моделей :

- 1. В основном для изучения эвтрофирования, распространения и трансформации загрязненных вод.**
- 2. Для того, что бы определить реакцию озерных экосистем на различные изменения внешних воздействий (антропогенные факторы, изменения климат) и проверять гипотезы, связанные с изменениями представлений о структуре и механизмах функционирования экосистемы.**
- 3. В задачах управления водопользованием.**

Примеры 3-Д моделей термогидродинамики для Великих озер

- POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg, Mellor, 1987, Mellor, 2003). Для озер - Beletsky, Schwab, 2008.
- ECOM (основанная на POM (Quamrul Ahsan, 1999)). В отличие от POM, в ECOM не используется прием спрямления дна, а в расчетах применяется неявная разностная схема.
- ELCOM (Estuary and Lake Computer Model), (Hodges et al., 2000 a,b; Laval et al., 2007).
- EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code), предназначенная для моделирования одно-, двух- и трехмерных водоёмов (США). Все применяют модель замыкания (Mellor, Yamada, 1982).
- DELFT 3D-ECO (Los Hans, 2009), (Нидерланды).
- NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean), (Madec et al., 2012).

Моделирование гидродинамики вод Ладожского и Онежского озер

Математические модели, разработанные для изучения динамики вод, экосистем Ладожского и Онежского озер СПб Институт экономики и математики РАН

- Модель термогидродинамики воспроизводит круглогодичную циркуляцию озера (систему течений и температурный режим) (Руховец Л.А. и др. 1987-2010)

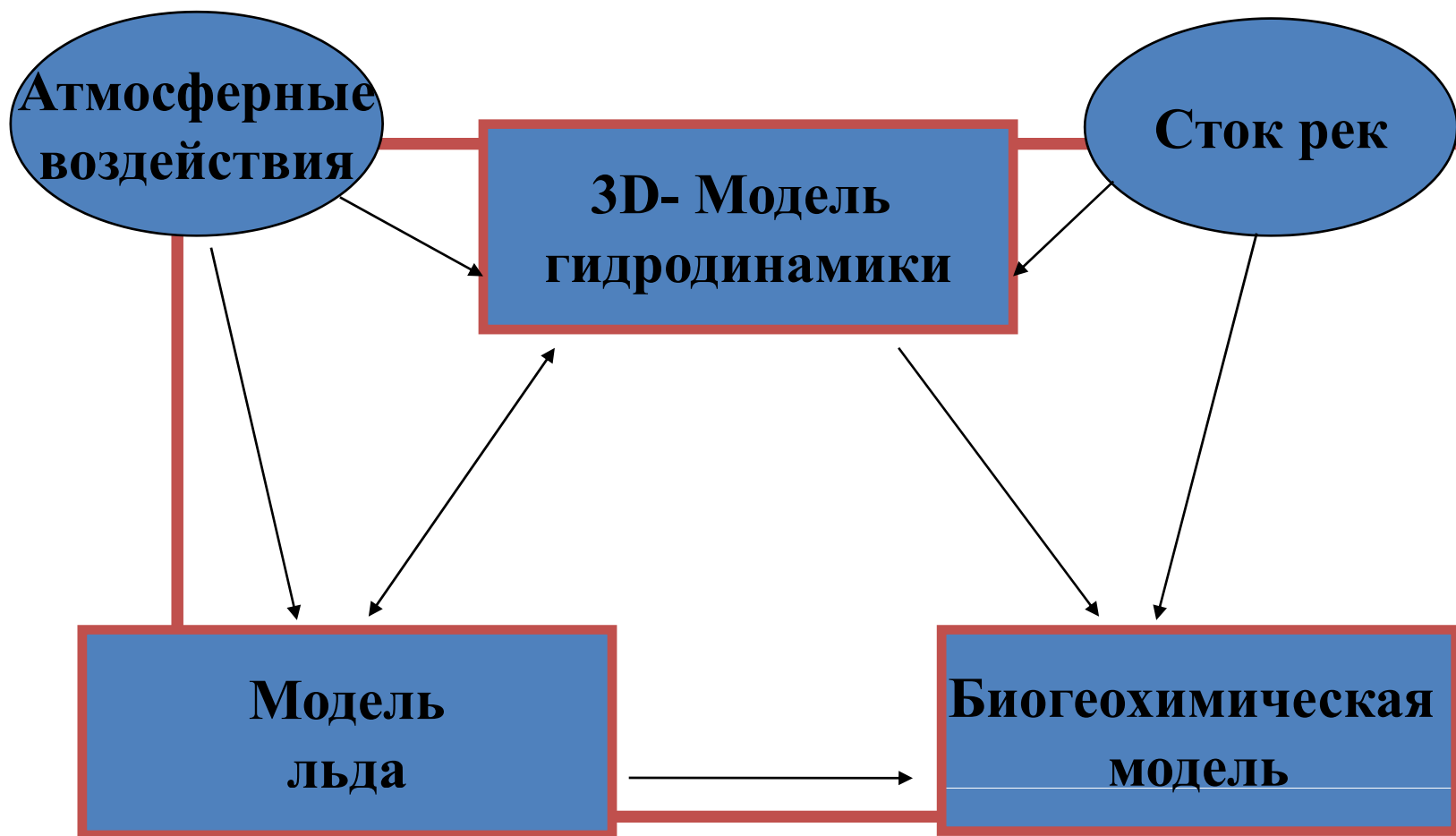
Модели экосистем, разработанные в СПб ЭМИ РАН:

- Модель экосистемы В.В. Меншуткина и О.Н. Воробьевой (1987)
- Модель биогидрохимического режима А.В. Леонова, М.М. Осташенко и Н.Н.Филатов (1990).
- Модель, основанная на круговороте азота и фосфора (1992)
- Базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998)
- Модель, имеющая три трофических уровня (1998)
- Модель, включающая зообентос (2003)
- Модель сукцессии фитопланктона (2003)
- Комплексная модель экосистемы озер (2008)
- Комплексная модель экосистемы озер с учетом усиления деструкции ОВ бактериопланктоном и водными грибами (2011)

Модели, разработанные для Ладожского и Онежского озер в СПб ЭМИ РАН при участии ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН.

Авт. Астраханцев, Меншуткин, Руховец и др.

Структура 3-D моделей экосистем



УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР

Уравнения движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - lv &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_w} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' \\ \frac{\partial v}{\partial t} + lu &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho_w} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Уравнение состояния:

$$\rho(T) = \rho_w [1 - 6.8 \cdot 10^{-6} (T - 4)^2], \quad [T] = ^\circ C \quad (3)$$

Уравнение переноса тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Закон изменения тепла в водоеме:

$$\frac{\partial}{\partial t} C_p^v \rho_w \int_{\Omega} T d\Omega = \int_{S_0} Q ds - C_p^v \rho_w \int_{S_{\text{втек}}} \bar{v}_n T_r ds - C_p^v \rho_w \int_{S_{\text{вытек}}} \bar{v}_n T ds - C_p^v \rho_w \int_{S_0} \frac{\partial \xi}{\partial t} T ds \quad (5)$$

ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

**Boundary conditions for \vec{v}
at $z = 0$:**

$$k_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_w}, \quad k_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (6)$$

$$w = \alpha \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (7)$$

Here τ_x , τ_y are wind stress components; $\alpha = 0, 1$

at $z = -H(x, y)$:

$$k_z \frac{\partial u}{\partial z} = k_2 U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad k_z \frac{\partial v}{\partial z} = k_2 V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (8)$$

$$w = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (9)$$

Here $\vec{V} = (U, V)$ is depth-averaged velocity vector;

$$U = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 u(x, y, z, t) dz, \quad V = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 v(x, y, z, t) dz.$$

On vertical side boundaries $\vec{V} = 0$ everywhere but river inlets.

**Boundary conditions for equation of heat transfer:
at $z = 0$**

$$v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c_p \rho_w} Q \quad (10)$$

At all solid boundaries heat flux is equal to zero. For inlets, the boundary condition is

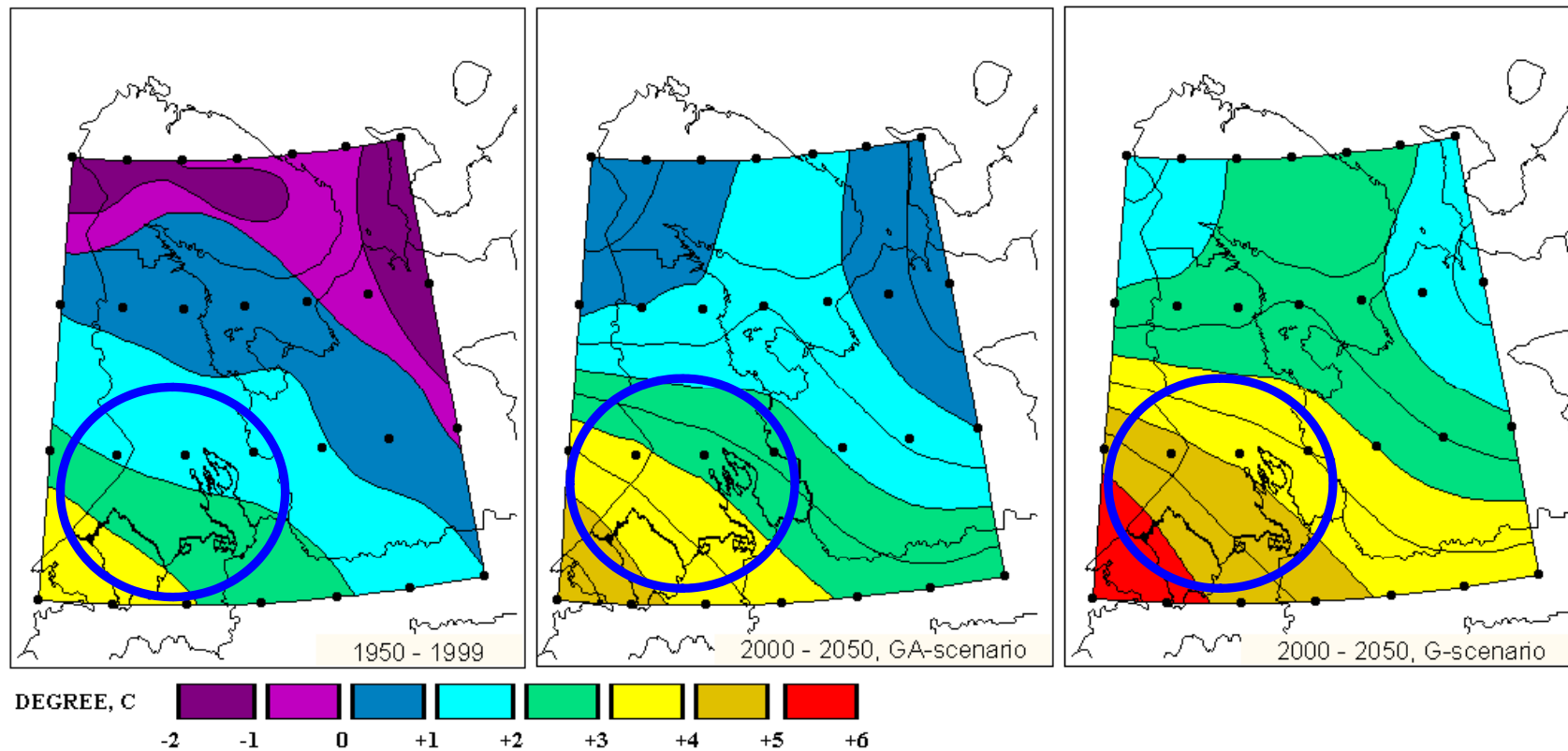
$$\frac{\partial T}{\partial N} - \vec{v}_n (T - T_n) = 0 \quad (11)$$

НА МОДЕЛЯХ СПБ ЭМИ РАН РАССЧИТАНЫ изменения термогидродинамики и экосистем озера для разных сценариев антропогенного воздействия и климат:

- **Для среднемноголетней среднеклиматической ситуации (НОРМА),**
- **Теплых лет (потепление климата на 1-2⁰С),**
- **Холодных лет (похолодание на на 1-2⁰С),**
- **Маловодных лет (пониженный сток рек),**
- **Многоводных периодов (повышенный сток рек).**
- **При разных антропогенных воздействиях: разных сценариях биогенной (фосфор и азот) нагрузки.**

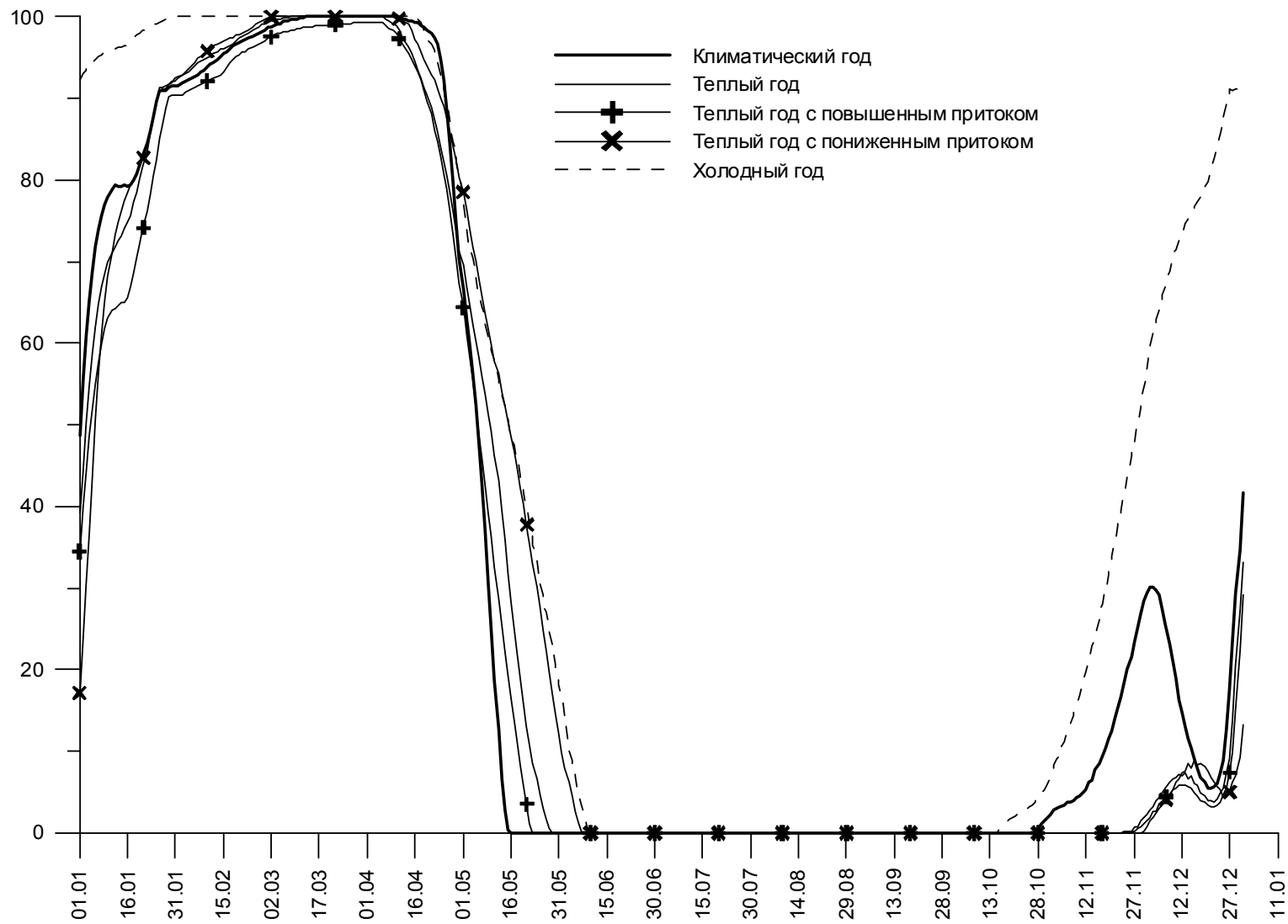
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ОЦЕНИВАЛИСЬ

по данным модели ЕСНАМ-4 для 1950-1999 гг. и 2000-2050 гг. по двум (потепление на 1.5 С и потепление и аэрозоли) сценариям IPCC



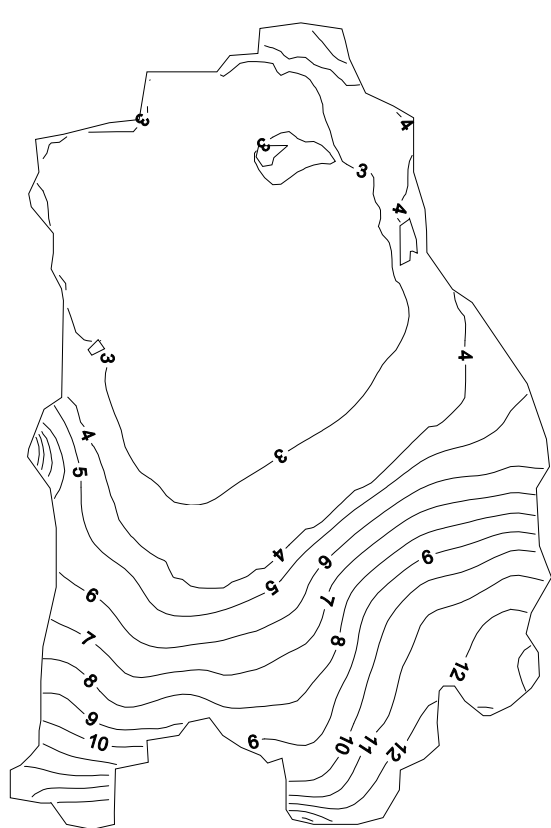
Для экосистемы важно корректно воспроизвести крупномасштабную циркуляцию вод климатического масштаба

- **Воспроизведению крупномасштабной циркуляции (климатической) - построение периодического решения, для чего требуется проводить расчеты на модели на значительное физическое время, кратное времени условного водообмена озера. Для Ладоги и Онега - приблизительно 12–14 лет.**
- **Практически счет на модели проводят до тех пор, пока озеро “не забудет” начальные условия и его циркуляция и температурный режим станут определяться текущими внешними воздействиями (Астраханцев и др., 2003а).**

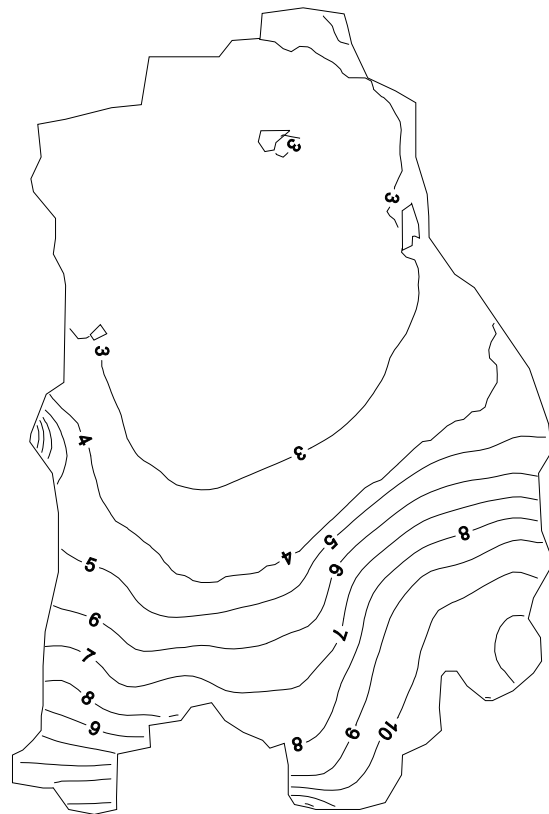


**Площадь ледового покрова (в % от площади озера)
(результаты моделирования)**

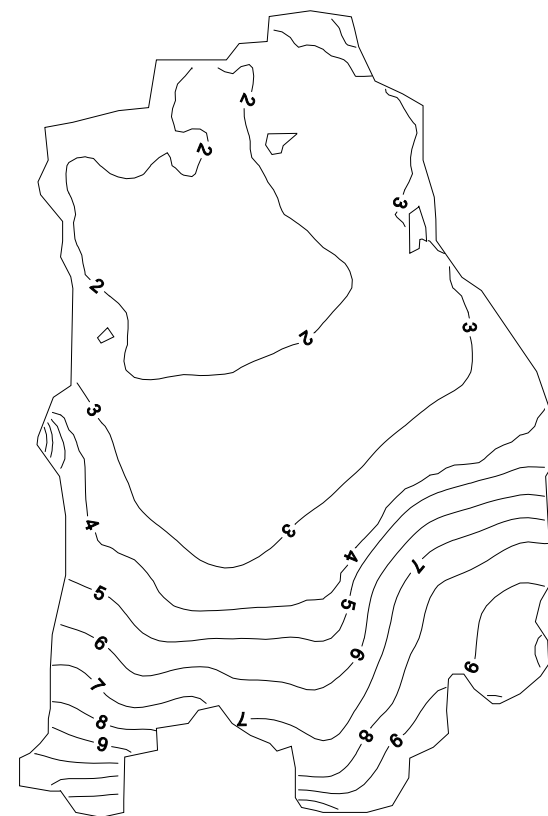
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТПВ



(a)



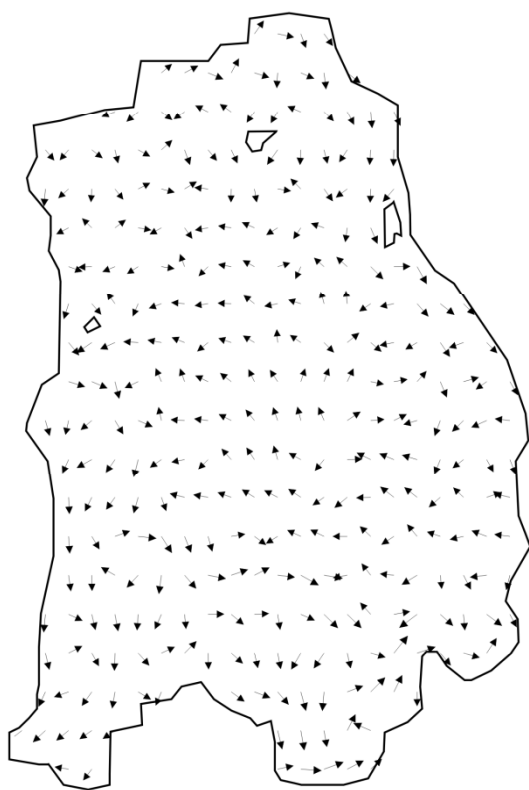
б



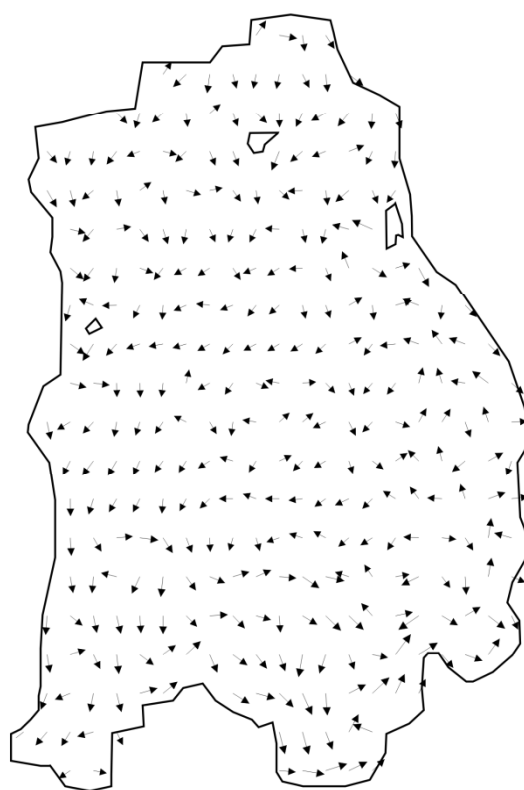
(в)

Ладожское озеро: июне (а) потепление климата на 2 С,
(б) норма (в) “похолодание климата на 2 С.

**Средние по глубине (интегральные) скорости течений
Ладожского озера (результаты моделирования)
15 мая (а), 15 июня (б), 15 июля (в)**



а



б



в

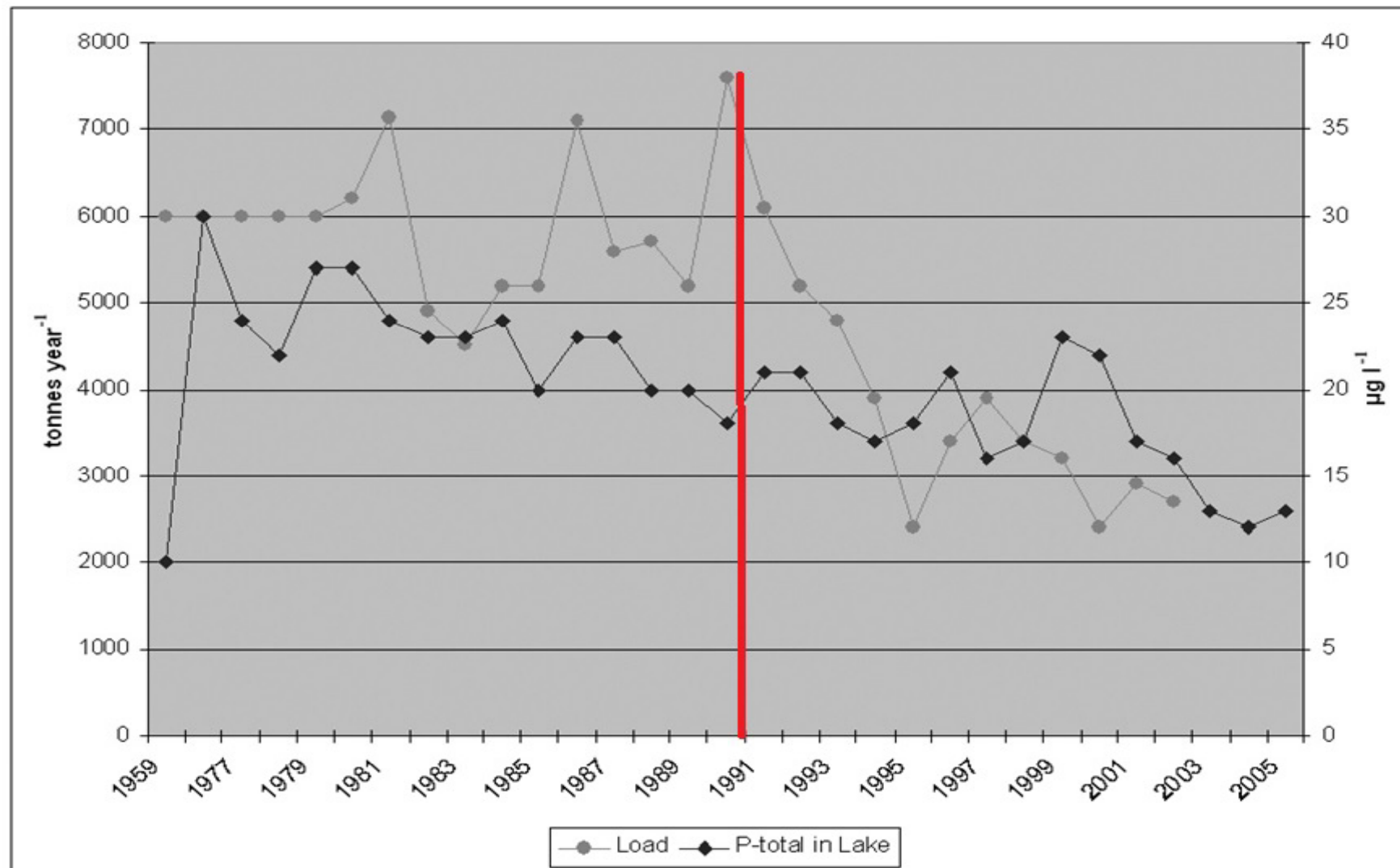
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ:

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ на 1.5 C:

- Стратификация воды весной наступает на 10 дней раньше;
- Термобар формируется на 10- 15 дней раньше;
- Ледяной покров появляется на Ладоге и Онего только в первой половине февраля, в то время как при норме (среднемноголетнем осреднении) – в конце декабря – начале января.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ ОЗЕР

ФОСФОРНАЯ НАГРУЗКА (тонн Р /год) на Ладожское озеро. Данные ИНОЗ РАН



Динамика экосистемы Ладоги по данным измерений

- До 1970 г .: Ладожское озеро - олиготрофный статус. Концентрация фосфора ~ 10 мкг Р / л.**
- 1970-е-1980-е годы: озеро подвергалось интенсивному воздействию человеческой деятельности и широко эксплуатировалось. Средняя концентрация фосфора увеличилась до 26 мкг Р / л.**
- 1991-2020: антропогенный стресс уменьшился за последние 30 лет из-за экономического спада, но в то же время эти годы продемонстрировали некоторые признаки потепления климата.**

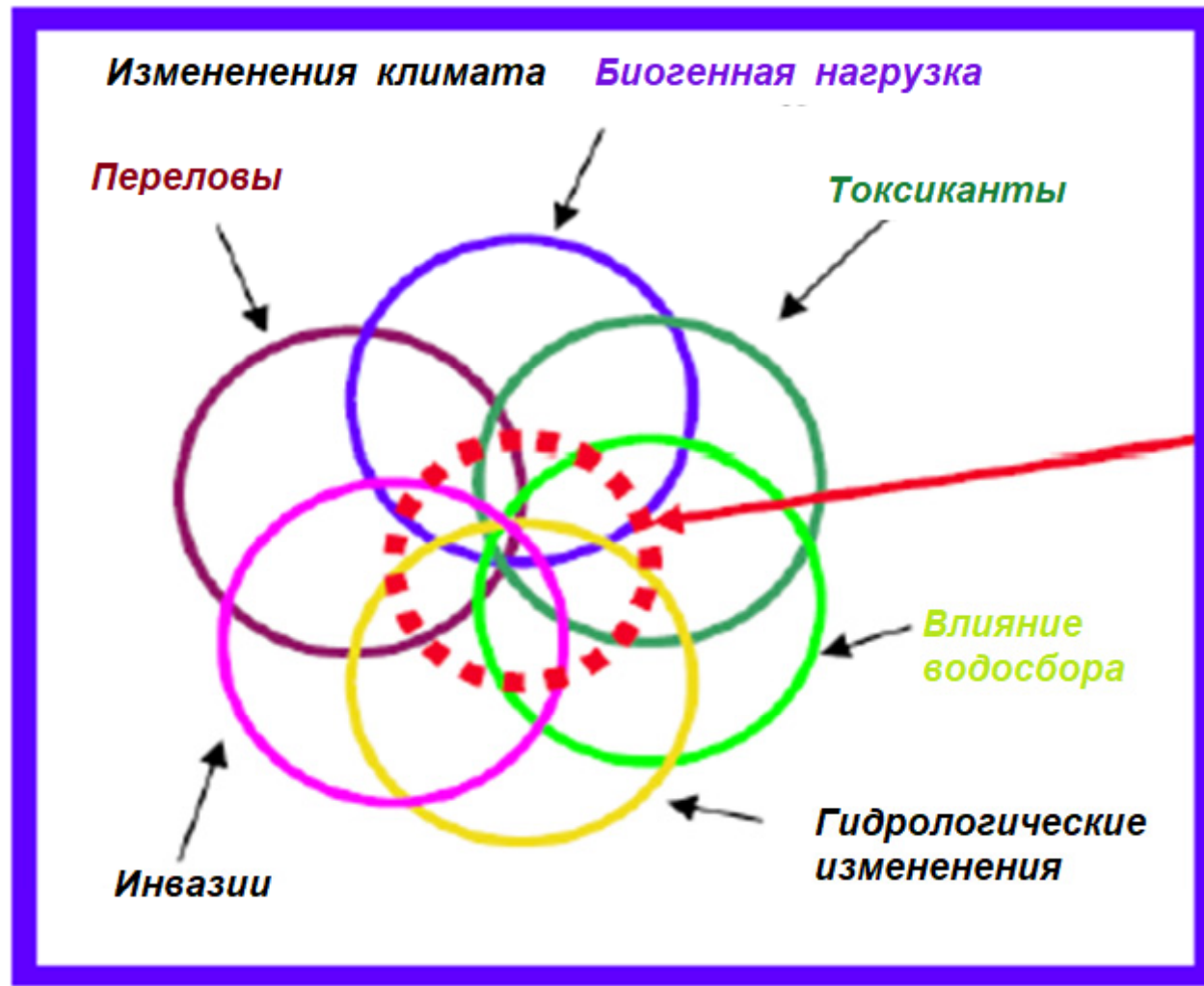
Динамика экосистемы Онежского озера по данным измерений

- 1970-1986 гг : антропогенные поступления привели к эволюции их трофического статуса от олиготрофного до мезо- и, в некоторых районах, эвтрофного.**
- 1991-2006: озеро в целом сохранило свой олиготрофный статус. Из-за низкой температуры воды продукционные процессы на всех трофических уровнях достаточно слабы.**
- В настоящее время средняя концентрация фосфора в озере составляет (8 ÷ 10) мкг Р/ л. Онежское озеро находится на стадии восстановления экосистемы, на начальном этапе эвтрофикации.**

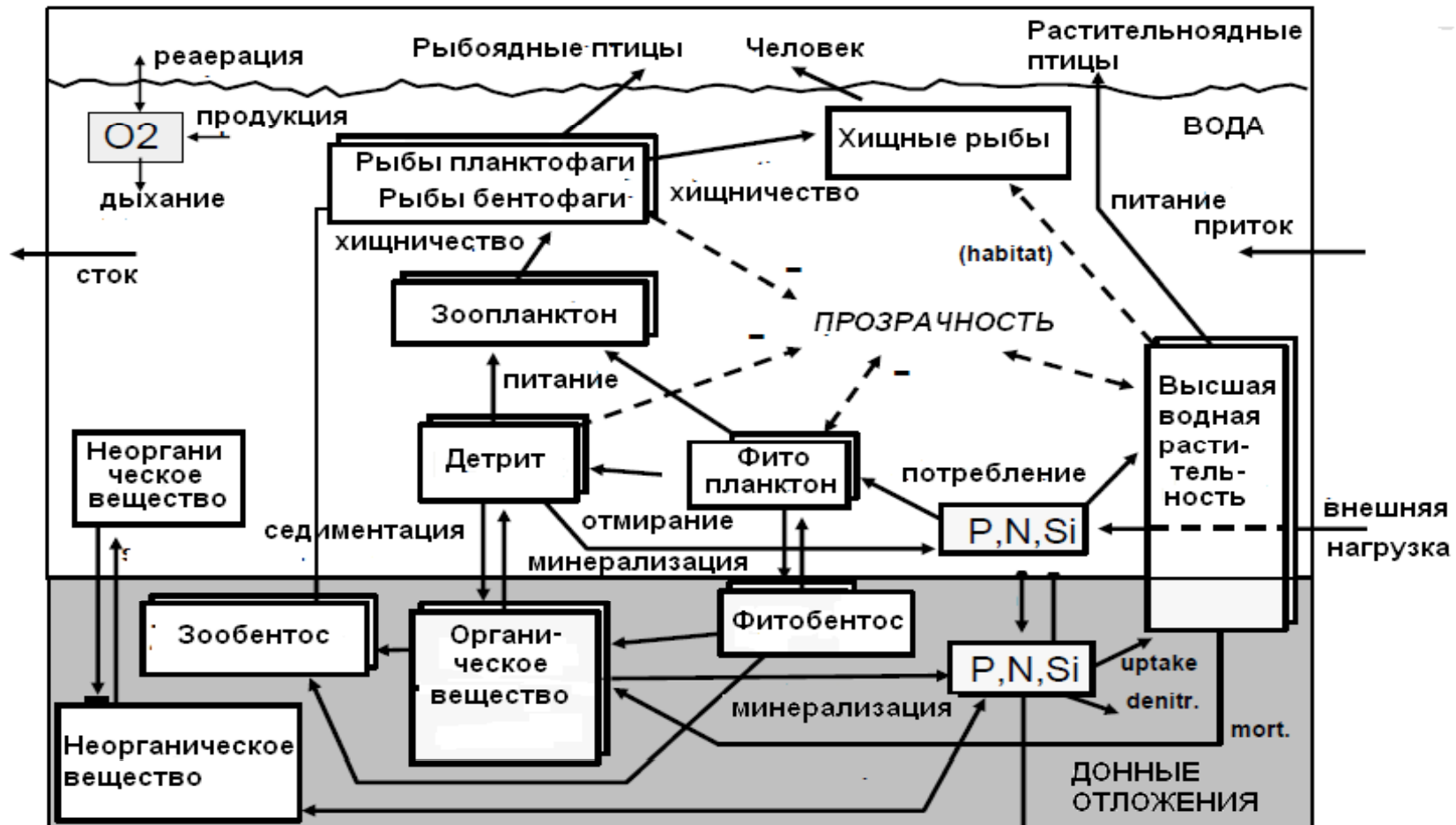
ОСОБЕННОСТИ ЭВТРОФИКАЦИИ ЛАДОЖСКОГО И ОНЕЖСКОГО ОЗЕР

- **В отличие от Ладожского, Онежское озеро имеет полузакрытые заливы, в которые значительные количества аллохтонного органического вещества поступают со сточными водами и речным стоком.**
- **В результате бактериопланктон развивается очень быстро, который разлагает аллохтонную органику и выделяет минерализованный фосфор.**
- **Это усиливает рост фитопланктона и, следовательно, увеличивает скорость эвтрофикации в озере.**
- **Это главная причина медленного восстановления водной экосистемы до олиготрофного статуса.**

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР (from Bails et al, 2005 with changes)



СТРУКТУРА МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА



Блок продуцентов: фитопланктон, и/или макрофиты, перифитон

Блок консументов - зоопланктон, бентос и рыбы.

Бактериопланктон и бактериобентос – редуценты (деструкторы)

МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ЛАДОГИ И ОНЕГО

Формулируются в виде краевых задач для систем дифференциальных уравнений переноса как консервативных, так и неконсервативных примесей в водной среде.

Эти уравнения включают нелинейные операторы, описывающие трансформацию живого и мертвого органического вещества (фитопланктона, зоопланктона, бактериопланктона, бентоса, детрита), и растворенных в воде биогенов (углерода, азота, фосфора и кремния).

В зависимости от задач иногда включаются рыбы, макрофиты, учитывается наличие растворенного в воде кислорода и его обмен с атмосферой через поверхность воды

Математические модели, разработанные для изучения динамики экосистем Ладожского и Онежского озер разработанные в СПб ЭМИ РАН (Меншуткин, Руховец, Филатов, 2014)

Модель экосистемы В.В. Меншуткина и О.Н. Воробьевой (1987).

Модель, основанная на круговороте азота и фосфора, рассчитывалась биомасса фито и зоопланктона.

- **Базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998)**
- **Модель, имеющая три трофических уровня (1998)**
- **Модель, включающая зообентос (2003)**
- **Модель сукцессии фитопланктона (2003)**
- **Комплексная модель экосистемы озер. 3 комплекса фитопланктона (9 групп), 2 -зоопланктона (2008)**
- **Комплексная модель экосистемы озер с учетом усиления деструкции ОВ бактериопланктоном и водными грибами (2011).**

3-D МОДЕЛЬ ОЗЕРА СУКЦЕССИИ ФИТОПЛАНКТОНА:

P – минеральный растворенный фосфор ($\mu\text{gP}\cdot\text{l}^{-1}$);

9 комплексов (Ph1, Ph2,..., Ph9) сообщества планктона. 4 диатомовых:

Aulacosira islandica, Asterionella Formosa,
Diatoma elongatum, Fragilaria crotonensis;

Желто-зеленые – *Tribonema affine*;

4 сине-зеленые – *Oscillatoria tenuis, Aphanizomenon flos-aquae,*
Microcystis aeruginosa, Woronichinia naegelian.

Z – zooplankton ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$): Z_f – мирный зоопланктон (фильтраторы);

Z_p – хищный зоопланктон, измеряемый в мг/л сырой биомассы;

DP – detrital phosphorus ($\mu\text{gP}\cdot\text{l}^{-1}$),

DOP – dissolved organic matter,

OX – dissolved oxygen ($\text{mg}\cdot\text{OX}\cdot\text{l}^{-1}$).

МОДЕЛЬ ВОСПРОИЗВОДИТ:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + L_C, \quad \frac{dB}{dT} = L_B$$

$C = Ph1; Ph2; \dots, Ph9, Z_f, Z_p, DP, DOP, P, OX.$

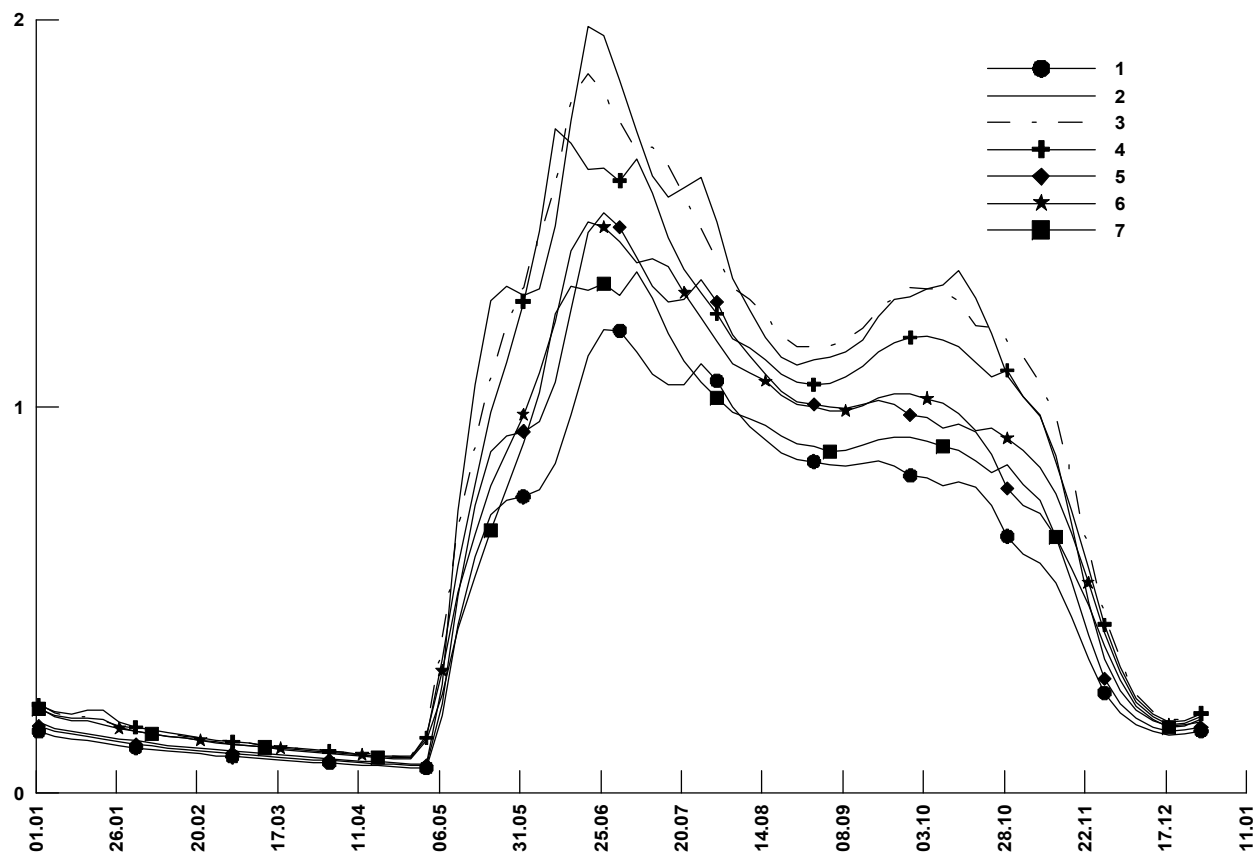
- перенос вещества;

- турбулентную диффузию и осаждение (для детрита и растворенного P сорбируется на частицах взвешенного вещества);

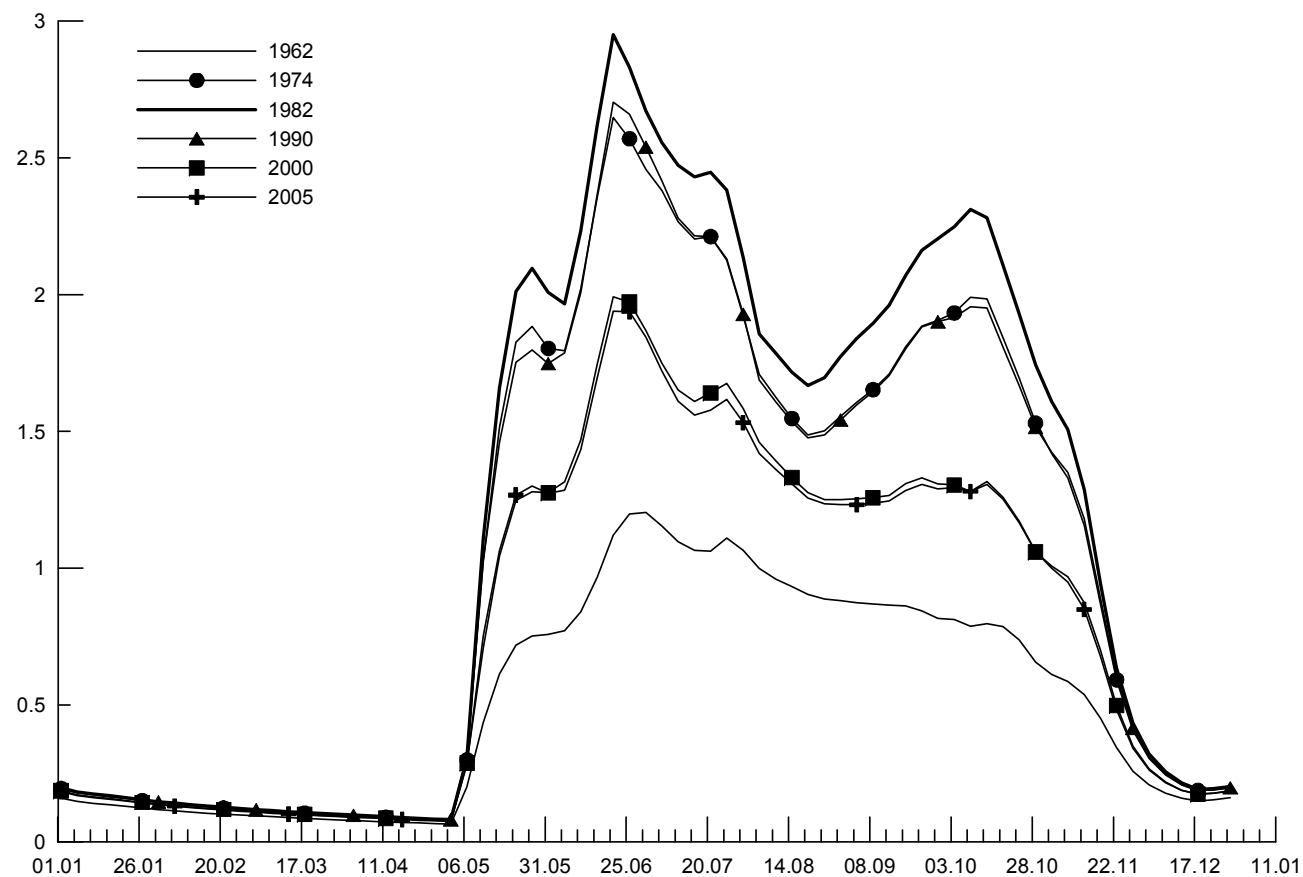
- преобразование органических компонентов

(фито- и зоопланктон, детрит и DOP), растворенные минералы P и O₂;

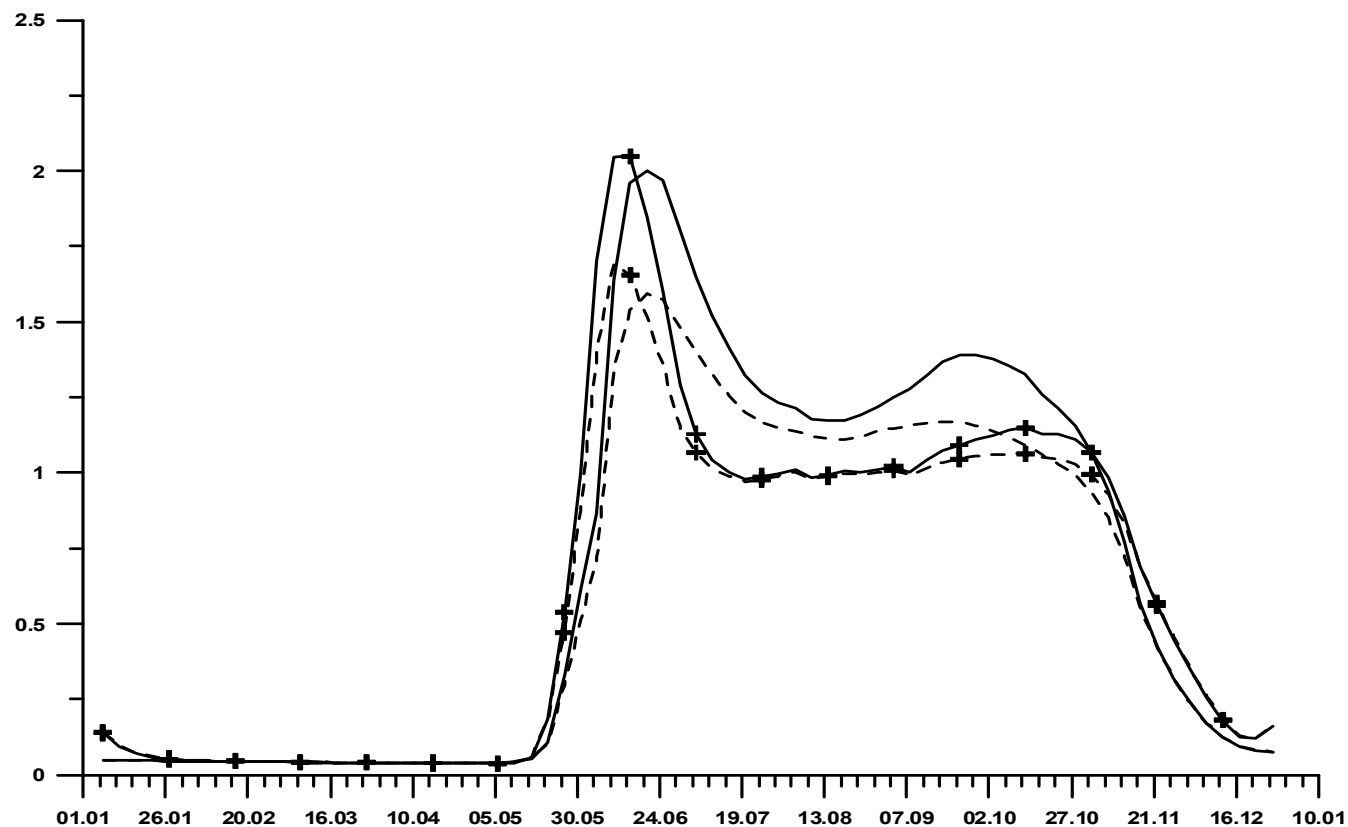
- Обмен O₂ через интерфейс вода-атмосфера.



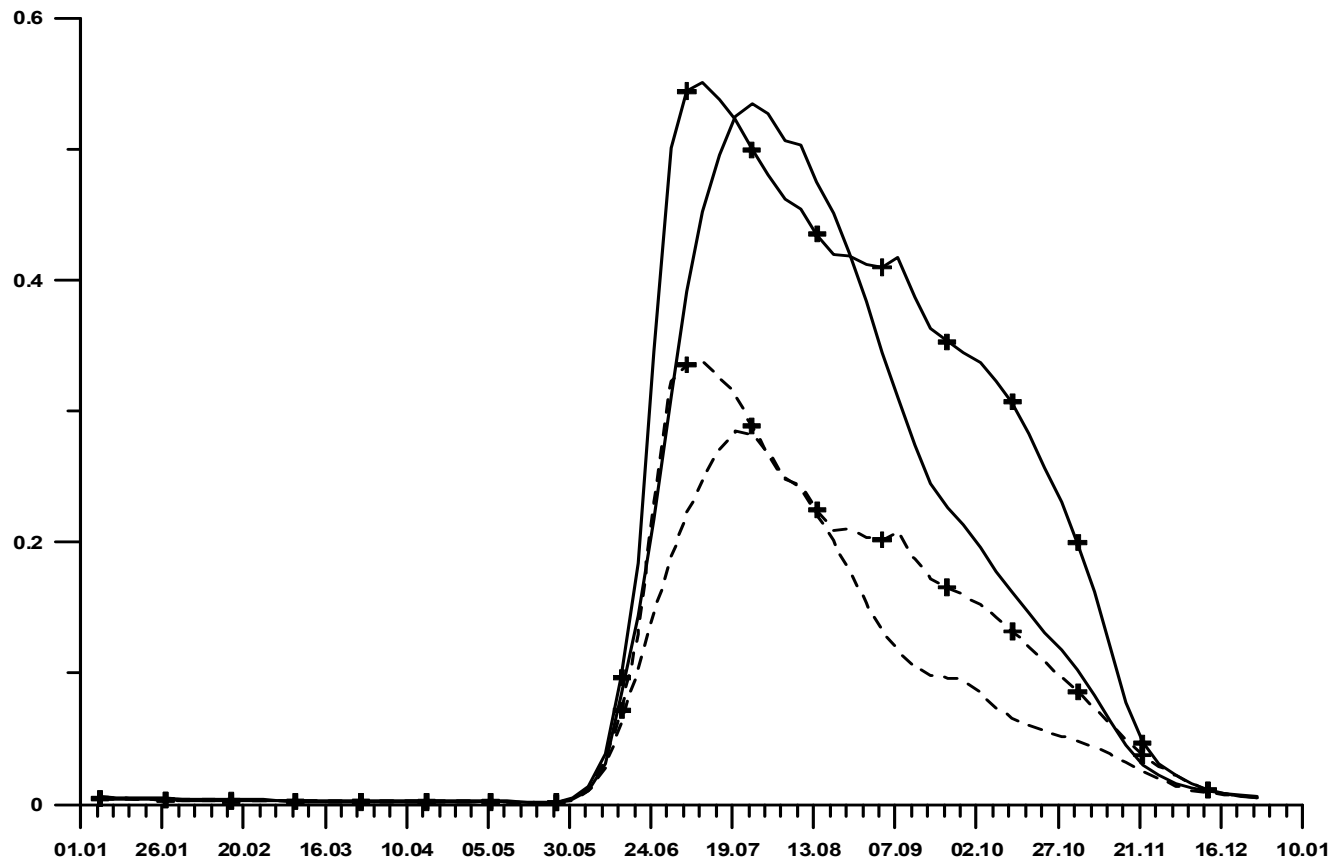
Годовая динамика сырой биомассы фитопланктона, мг/л,
 в эпилимнионе Ладожского озера (результаты моделирования):
 (1) 1962 год, фосфорная нагрузка – 2430 т P_{total} /год, климатическая циркуляция
 2005 год, фосфорная нагрузка – 4000 т P_{total} /год:
 (2) Климатическая циркуляция, (3) теплая циркуляция, (4) теплая циркуляция
 с повышенным притоком; 2005 год, фосфорная нагрузка – 2430 т P_{total} /год:
 (5) Климатическая циркуляция, (6) теплая циркуляция, (7) теплая циркуляция
 с повышенным притоком.



Годовое изменение суммарной биомассы (мг/л) фитопланктона осредненной по эпилимниону в отдельные годы
По данным измерений



Фитопланктон в эпилимнионе Онеги (мг/л) для климатической циркуляции при нагрузках: сплошная линия – 1003 тР/год, 17739 тN/год; пунктирная линия – 786 тР/год, 15051 т N/год, линии с + для случая теплой циркуляции при тех же нагрузках.



Зоопланктон в эпилимнионе Онеги (мг/л) для климатической циркуляции при нагрузках: сплошная линия – 1003 тР/год, 17739 тN/год; пунктирная линия – 786 тР/год, 15051 тN/год, линии с + для случая теплой циркуляции при тех же нагрузках.

НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ ПО ОЦЕНКЕ ОТКЛИКА ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

- Оценки возможных изменений гидротермодинамического режима и реакции экосистемы на изменения климата показывают, что к 20 м годам 21-го века воздействие потепления на экосистему озер будет незначительным.
- При потеплении климата и достижении температуры воды озера 8 °C будет отмечаться снижение биомассы фитопланктона, что объясняется тем, что водоросль *Aulacosira islandica* развивается только при температуре воды, не превышающей 8 °C , а эта водоросль дает главный вклад в биомассу фитопланктона весной и осенью.
- Важным следствием проведенных экспериментов является то, что антропогенный пресс является основным фактором, определяющим состояние экосистемы и качество воды в озерах.
- **В будущем**, при условии снижения антропогенной нагрузки роль климатических факторов в формировании динамики экосистем озер может оказаться более существенной. Но отмечу (2019) влияние климатических факторов сравнимо с антропогенными.

ПРОБЛЕМЫ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВЕЛИКИХ ОЗЕР

- Антропогенное воздействие на большие стратифицированные озера имеет весьма длительное последствие, исчисляемое многими годами и даже десятилетиями. Это время практически кратно времени условного водообмена озер. Для Ладоги и Онего – порядка 12-14 лет.
- При избыточном поступлении в водоём биогенов (например, фосфора): запущенный ростом поступления процесс антропогенного эвтрофирования большого стратифицированного озера сложно остановить, даже снизив поступление фосфора в водоем.
- Ни одно из больших стратифицированных озер Мира, в которые биогенная нагрузка была существенно снижена, не вернулось в исходное природное состояние.

ЧТО НАДО СДЕЛАТЬ, ЧТОБЫ СОХРАНИТЬ РЕСУРСЫ ОЗЕР И ИХ РАЦИОНАЛЬНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ НО ЭТО ПОСЛЕ РАСЧЕТОВ!

- **Необходимо уменьшить поступление биогенов в озера. Для Ладоги нагрузка должна быть снижена до уровня 1800 т P/год, что более чем на четверть меньше нагрузки, имевшей место до 1962 года – 2430 т P/год. Для Онежского озера фосфорная нагрузка должна быть менее 600 т P/год. Как это осуществить в условиях рыночной экономики?**
- **Требуется строительство и совершенствование КОС, снижение поступления $P_{\text{общ}}$ с очистных сооружений, использование наилучших водоохраных технологий.**
- **Необходима строгая регламентация рыбоводства на озерах из-за интенсивного развития форелевых хозяйств для уменьшения биогенной нагрузки. На озерах Карелии производится 75 % форели.**
- **Необходимо совершенствование системы наблюдений (мониторинга). Проблема экспериментальных данных.**

ПРИМЕРЫ 3-Д МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ

- CAEDYM – ELKOM (Hipsey, Hamilton, 2008), углерод, азот, фосфор и кремний; фитопланктон, зоопланктон, бентос, рыбы и макрофиты представлены различным числом групп.
- PROTECH (Phytoplankton RespOnces To Environment Changes). Включает биогены, 10 групп фитопланктона. (Reynolds et al., 2001).
- DELFT 3D-ECO (Los Hans, 2009), (Нидерланды) имеет блок BLOOM.
- IPH-PCLake (Fragoso et al., 2009) имеет 3-D, три группы фитопланктона, и три трофические группы рыб. Зоопланктон и бентос не имеют разделения.
- GLOBIO3 (Alkemade et al., 2000).
- Использование стохастического моделирования более характерно для моделей популяций и сообществ, чем для моделей экосистем.
- LakeWeb catchment area (Håkanson & Vuolion, 2002).
- BFM, NEMO - 3-D, около 50 переменных.
- **Наличие большого числа и разнообразие моделей экосистем озер объясняется тем, что даже при сходстве абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем озер, приоритетность механизмов зачастую различается и потому создание универсальных моделей представляется проблематичным.**



Владимир Васильевич Меншуткин родился в 1930 году. В 1955 году окончил Ленинградский Кораблестроительный институт и работал в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в качестве инженера-исследователя. В 1958 году поступил в аспирантуру Сибирского отделения Академии наук СССР. В 1965 году защитил кандидатскую, а в 1974 году докторскую диссертацию в области биологии. Работал в Лимнологическом институте СО АН на Байкале, в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН в Санкт-Петербурге, а так же в Международном Экологическом центре в Варшаве. С 1987 года — профессор. В настоящее время — главный научный сотрудник лаборатории моделирования Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН.

Основное направление исследований — математическое и имитационное моделирование в биологии, физиологии, экологии, лимнологии и океанологии. За построение модели экосистемы озера Дальнего (Камчатка) в 1971 году совместно с Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохиным удостоен Государственной премии СССР. В 2006 году за разработку методов и моделей для решения задач рационального природопользования удостоен медали и премии им. А. П. Карпинского в области наук о Земле.

В. В. Меншуткин — автор более 200 печатных работ, в том числе 10 книг. В новой книге «Искусство моделирования» он обобщил свой опыт моделирования в разных областях науки и техники. Предлагаемая книга адресована всем, кто интересуется наукой.

В. В. Меншуткин ИСКУССТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. В. Меншуткин

ИСКУССТВО



МОДЕЛИРОВАНИЯ

Свойства моделей озерных экологических систем

Тип модели: STA – статическая, CDN – сложная динамическая, MDN – динамическая, минимальной сложности, IBM – объектно-ориентированная, S/PM – с учетом возрастной или размерной структуры, TMB – адаптивная

Название модели	Vollenweider	CE-QUAL-W2	DELFT3D-ECO	DYRESM-MYL2	CAEDYM-ELCOM	PLake	Озеро Шира	Ладожское оз.	ИРП-TRIM3D-PLAKE	PROTECH	SALMO	CHARISMA	PISCATOR	Адапционная модель
Тип модели	STA	CDN	CDN	CDN	CDN	CDN	CDN	CDN	CDN	MDN	IBM	S/PM	TBM	TBM
Размерность	0-D	2-DV	3-D	1-DV	3-D	1-DV 1-DH	1-DV	3-D	3-D	1-DV	0-D	0-D	0-D	0-D
Наличие вертикальной стратификации	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Учет процесса седиментации	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-
Выделение литоральной зоны	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Число групп фитопланктона	0	3	3-6	7	7	3	3	9	3	10	2-10	0	0	1
Число групп зоопланктона	0	3	1-3	5	5	1	1	2	1	1	1	0	0	1
Число групп бентоса	0	0	1	6	6	3	1	1	1	0	0	0	1	0
Число групп макрофитов	0	0	3	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Число групп рыб	0	0	0	0	3	1	0	7	3	0	0	0	3	0
Течения и турбулентная диффузия	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Тепловой баланс и теплопередача	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Математический аппарат: RGR – регрессионные уравнения, PDE – системы дифференциальных уравнений в частных производных OD – системы обыкновенных дифференциальных уравнений, DIF – системы конечноразностных уравнений.

Баланс кислорода	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-
Баланс углекислого газа	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Баланс органического вещества	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
Учет деятельности микроорганизмов	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-
Внешняя фосфорная нагрузка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Внешняя азотная нагрузка	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Баланс общего фосфора	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Баланс всех форм азота	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Баланс кремния	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Рыболовство	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-
Математический аппарат	RGR	PDE	PDE	PDE	PDE	PDE	PDE	PDE	PDE	O/OD	PDE	DIF	DIF	O/OD
Учет и проверка выполнения законов сохранения	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Применения критерия оптимальности	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Анализ чувствительности	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-
Калибрация по натурным данным	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-
Имитация процесса евтрофикации	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Исследование влияния изменения климата	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-
Имитация различных режимов рыболовства	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-

НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ К 2014 Г.

- Наиболее совершенный в начале 2000 г. комплекс моделей, созданный в СПб ЭМИ РАН имеет ряд недостатков: слабое задание атмосферных воздействий, не воспроизводится «жизнь подо льдом», не используется модель льда.
- С 2014 г. Комплекс моделей не поддерживается из-за ухода из жизни одного из основных разработчиков- проф. Л.А. Руховца.
- Нет математических моделей экосистем, на которых могут быть основаны для систем поддержки принятия управленческих решений (СППУР) для озер. Такие системы разработаны для Великих американских озер, для Балтики – систем NEST.

Задачи, поставленные Президентом РФ В.В. Путиным на заседании Совета Безопасности РФ от 20.11. 2013 г. и в Указе Президента РФ от 7 мая 2018 года «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

- **«.. необходимо обеспечить решение задач по сохранению уникальных водных объектов, в том числе по сохранению озера Байкал, а также выполнить ряд мероприятий по берегам и прибрежной акватории озер Байкал, Телецкое, Ладожское, Онежское и рек Волга, Дон, Обь, Енисей, Амур, Урал, Печора.»**
- **«Ухудшение качества вод Ладожского и Онежского озер может привести к проблемам с обеспечением питьевой водой всего Северо-Западного региона Российской Федерации. Этим вопросом нужно заняться предметно как на федеральном, так и на региональном уровне»**

ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЗЕР:

- По проекту РНФ № 14-17- 00740 «Озера России - диагноз и прогноз» были поставлены задачи - оценить современное состояние и изменения термогидродинамических процессов и экосистем озер.
- (ИВМ, ИНОЗ, ИВПС, ИВП РАН).

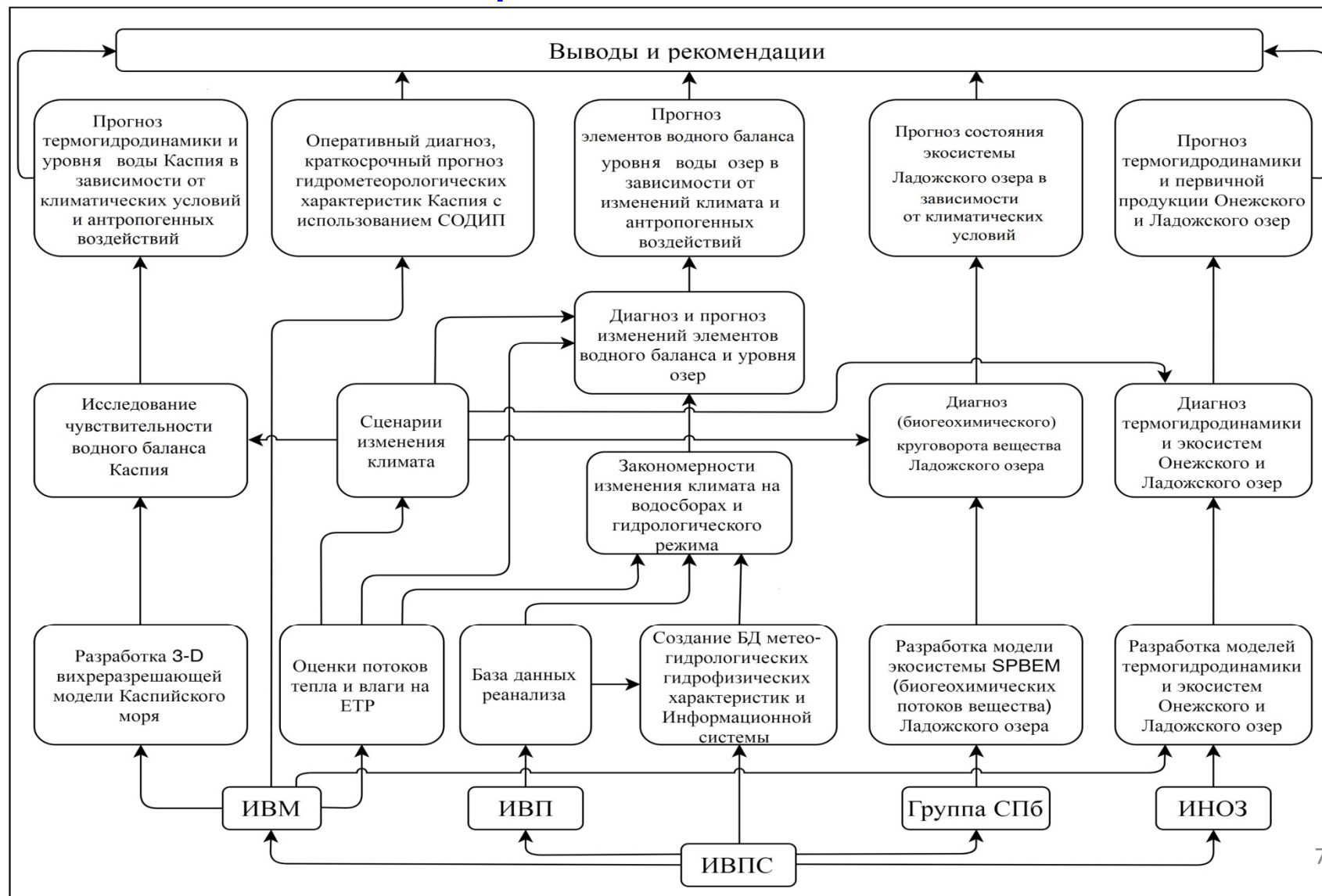
В 2015-2019 ГГ. РАЗРАБОТАНЫ:

- 3-D модели для Ладожского и Онежского озер (Голосов,Зверев, 2018) на основе модели, ранее созданной (Р.А.Ибраев) для Каспия; В этих моделях более корректно задается форсинг (атмосферные воздействия), описывается ледяной покров, возможно использование кластеров для расчетов и др.
- Включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, намерзание, таяние) во льду и динамические процессы (движение, торошение и т.д.).
- Решается проблема сложной геометрии расчетной области, что важно для описание заливов, шхер, прибрежной зоны озер.

Впервые создана 3-D модель (А.В.Исаев, О.П.Савчук, Филатов Н.Н.), которая позволяет воспроизводить особенности концентраций и биомасс компонентов экосистемы в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации .В этой модели учитывается динамика биогенов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов.

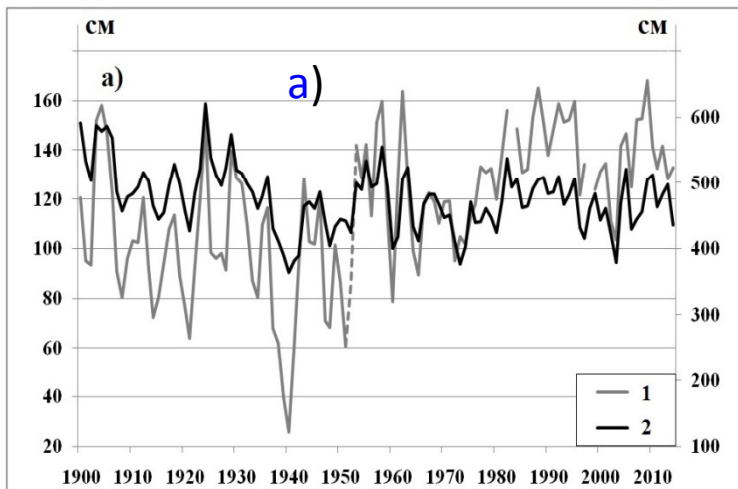
Алгоритм реализации задач диагноза и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем крупных озер под влиянием антропогенных факторов и климата коллективом исследователей

Проект РФФ 2014-2018

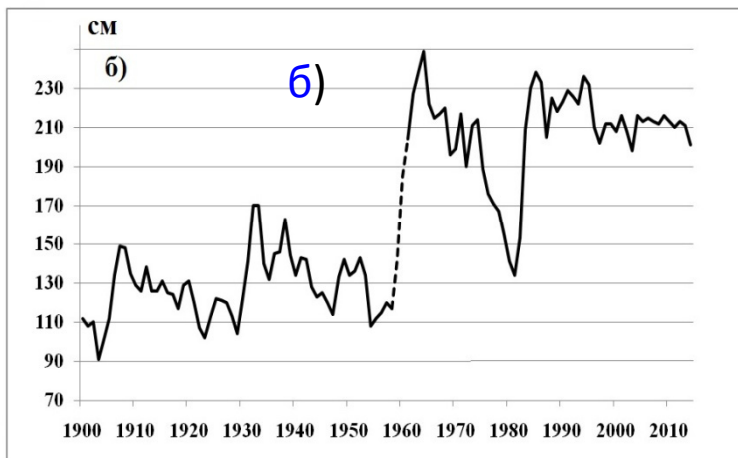


ЗАДАЧИ :

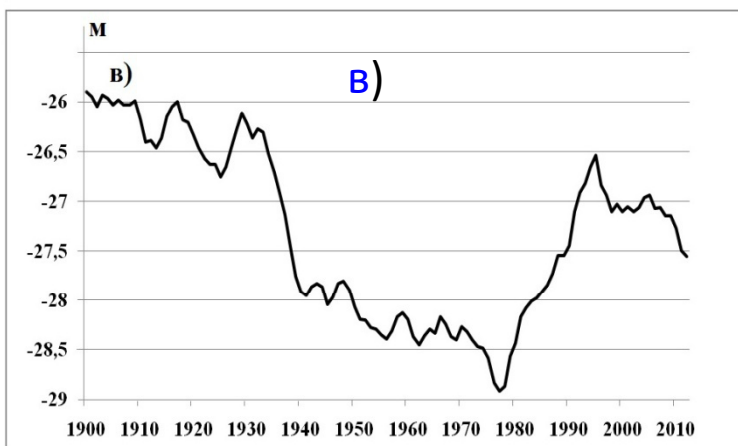
- Выявить закономерности** внутривековых изменений уровня, ЭВБ, климата на водосборах крупнейших озер России на единой методологической основе для выявления общих глобальных и региональных закономерностей.
- Определить** чувствительность гидрологического режима озер с зарегулированным и не зарегулированным режимами к изменениям климата.
- Изучить влияние** Северной Атлантики на аномалии климата Евразии, гидрологический режимом озер с использованием моделей, разработанных в ИВМ РАН.
- Оценить удаленные** связи изменений климата и их влияния на озера Евразии.
- Совершенствовать прогноз** изменения гидрологического режима и экосистем озер Евразии при разных сценариях изменений климата и антропогенного воздействия с использованием новых более совершенных моделей.
- Выполнить разработку** новых моделей термогидродинамики и экосистем озер.



**Изменчивость уровни воды в озерах: а)
Ладожском (1) и Онежском озерах (2),
б) Байкал, в) Каспийском море-озере.
По данным за 1900-2014 гг.**



**Природные климатические
внутривековые колебания уровня
воды в озерах Онежское, Саймаа,
Байкал, а также Верхнее, Онтарио
«подавляются» регулированием
уровня воды этих озер**



Изменения уровня Каспийского моря по данным измерений.

Уровень Каспия данные

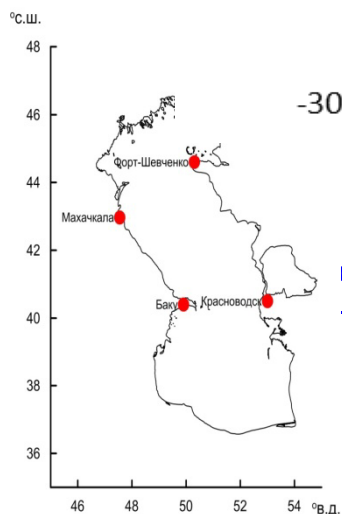
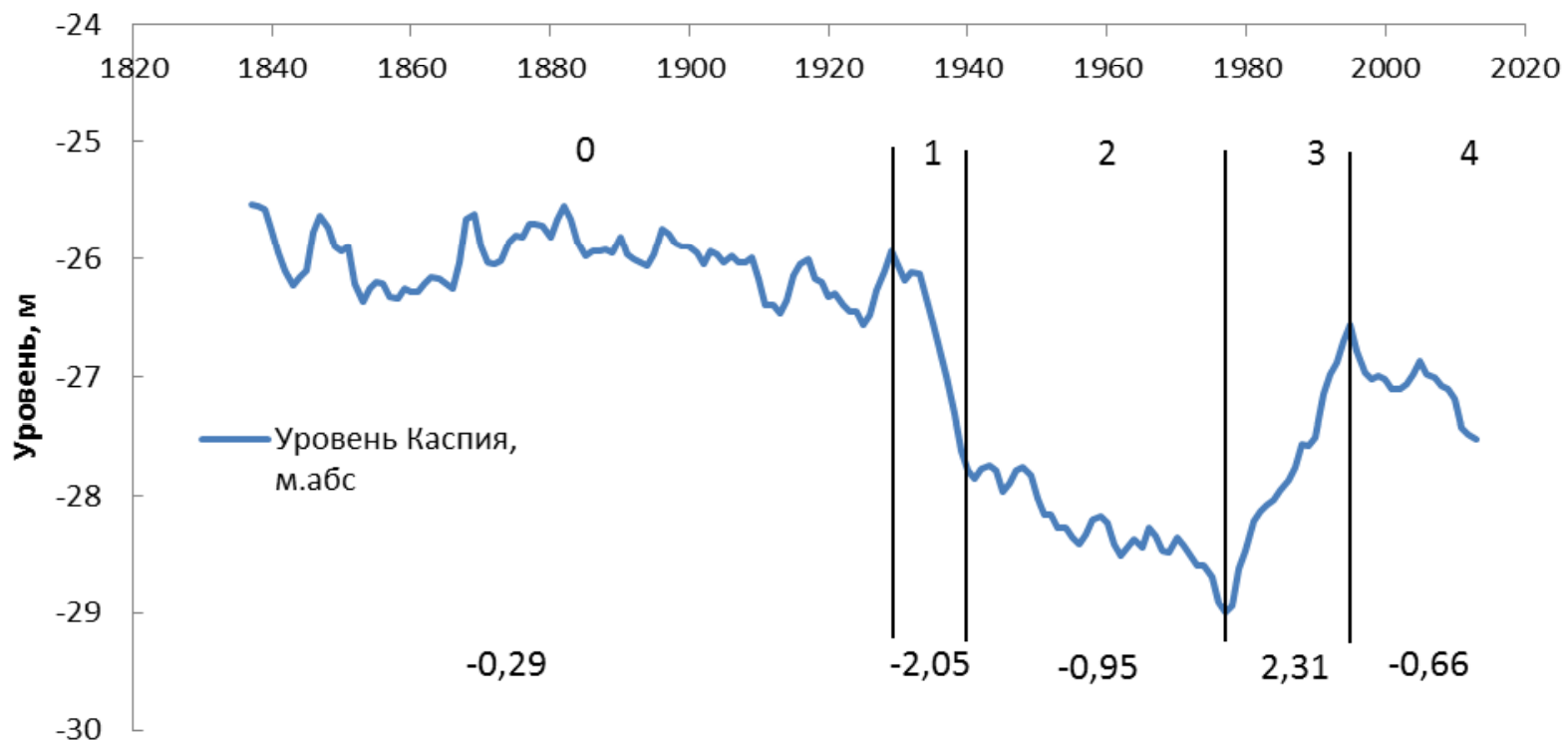


Схема расположения использованных для анализа точек уровенных наблюдений на Каспийском море.

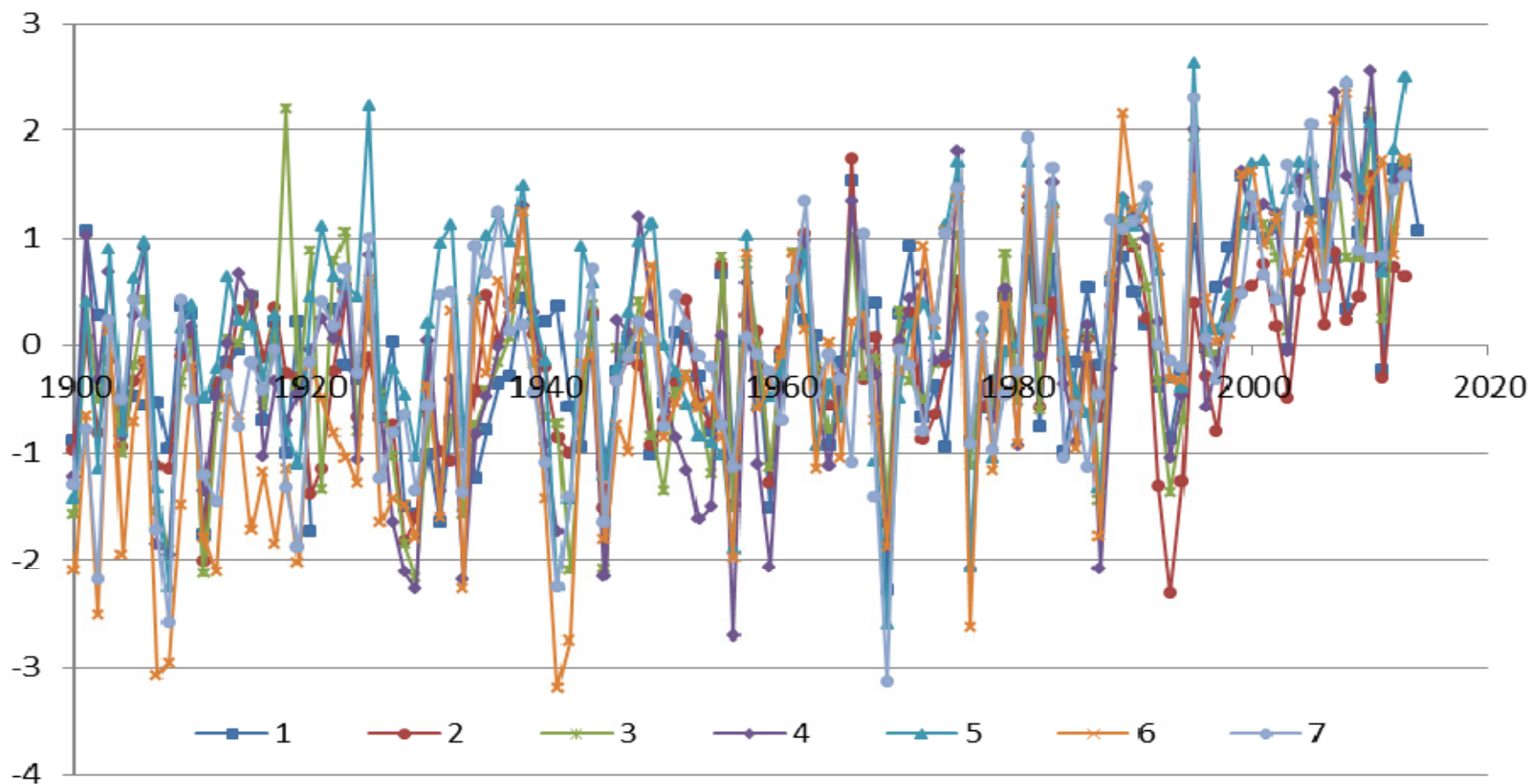
Показано, что в период подъема уровня Каспийского моря зона влияния НАО в два раза больше, чем в период его спада

Водосбор Каспия,
3 626 000 км²
акватория ок. 371 000 км²

Исследования изменений климата,
гидрологического режима Каспийского
моря-озера. (Дианский и др, 2018: Ибраев, 2020)

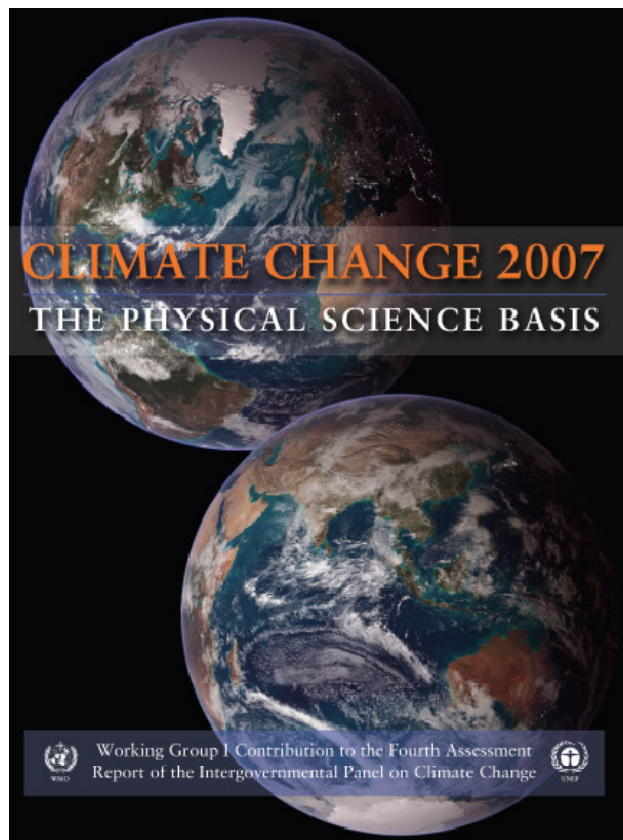


**Изменчивость температуры воздуха в бассейне Каспийского моря.
Средняя годовая температура воздуха в городах Краснодарск, Махачкала(отклонения от климатической нормы), Астрахань, Волгоград, Казань, Москва, Пермь 1888 по 2013 г.**

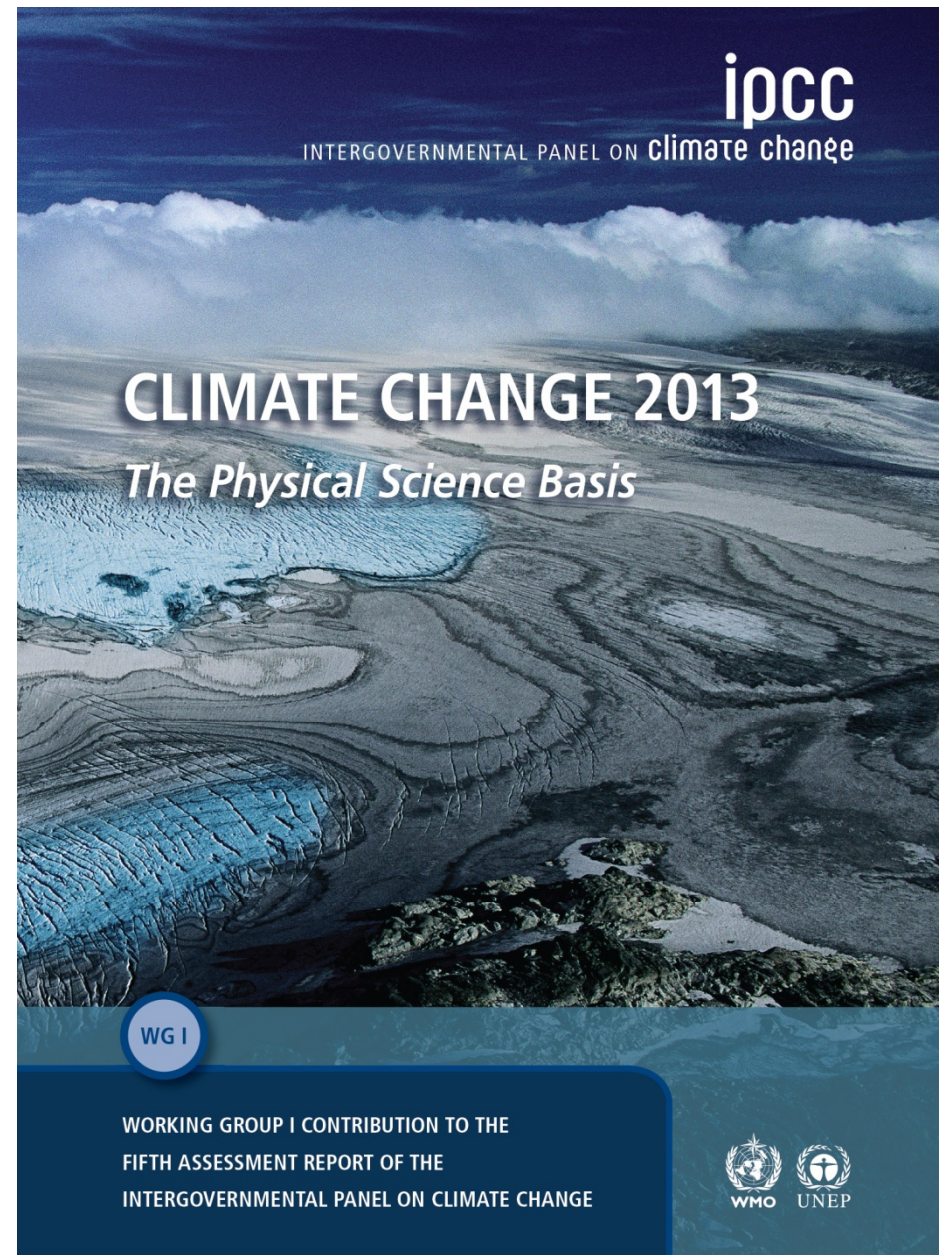


Глобальная версия INMOM используется в качестве океанического компонента российской климатической модели INMCM (Института вычислительной математики РАН).

INMCM3 с INMOM 2x2,5 град. Резолюция была представлена в Четвертом оценочном отчете МГЭИК (AR-4, 2007).



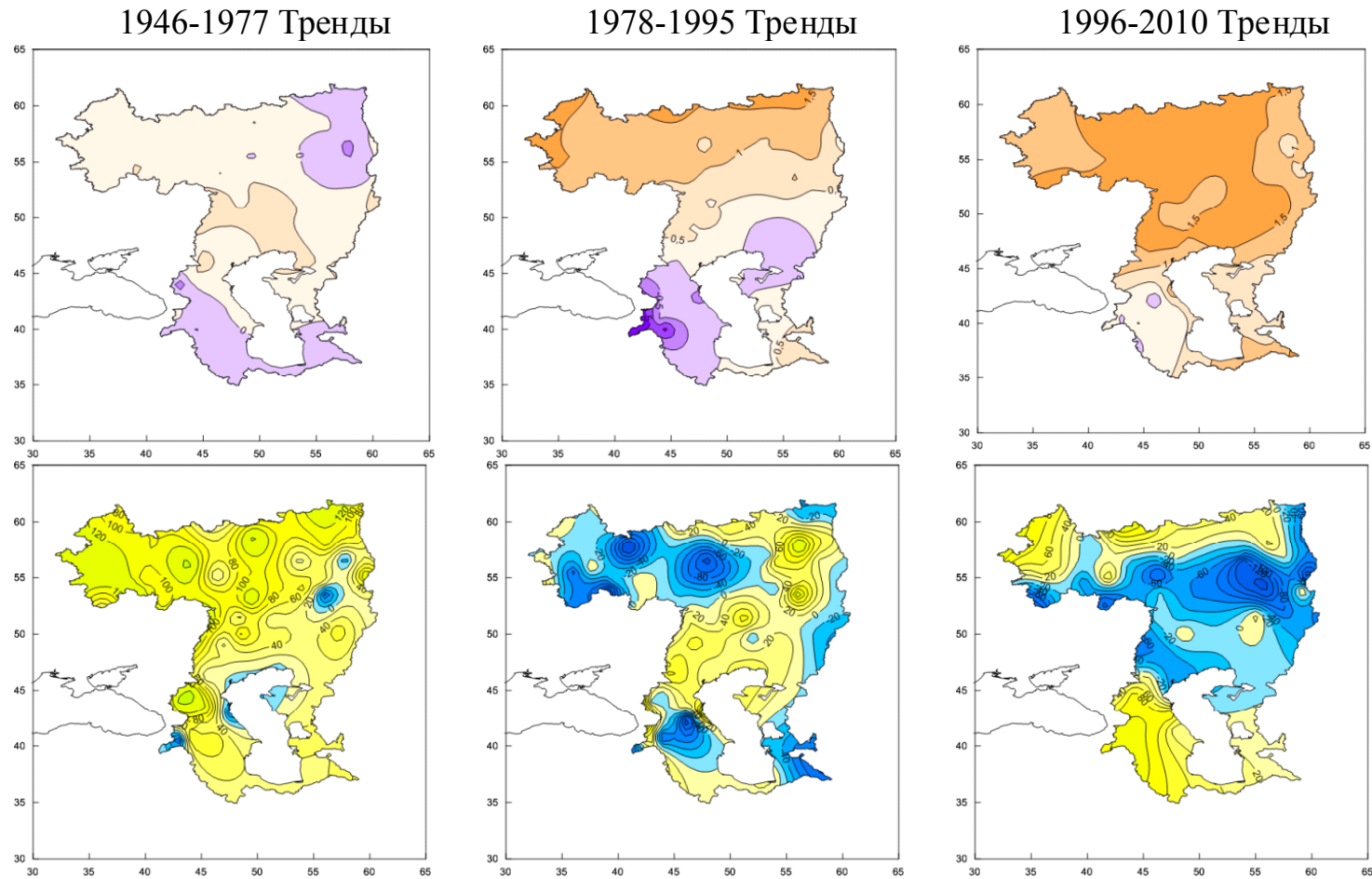
INMCM4 with INMOM of 0.5x1 deg. resolution is presented in the IPCC AR-5.



ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ И ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ-ОЗЕРА.

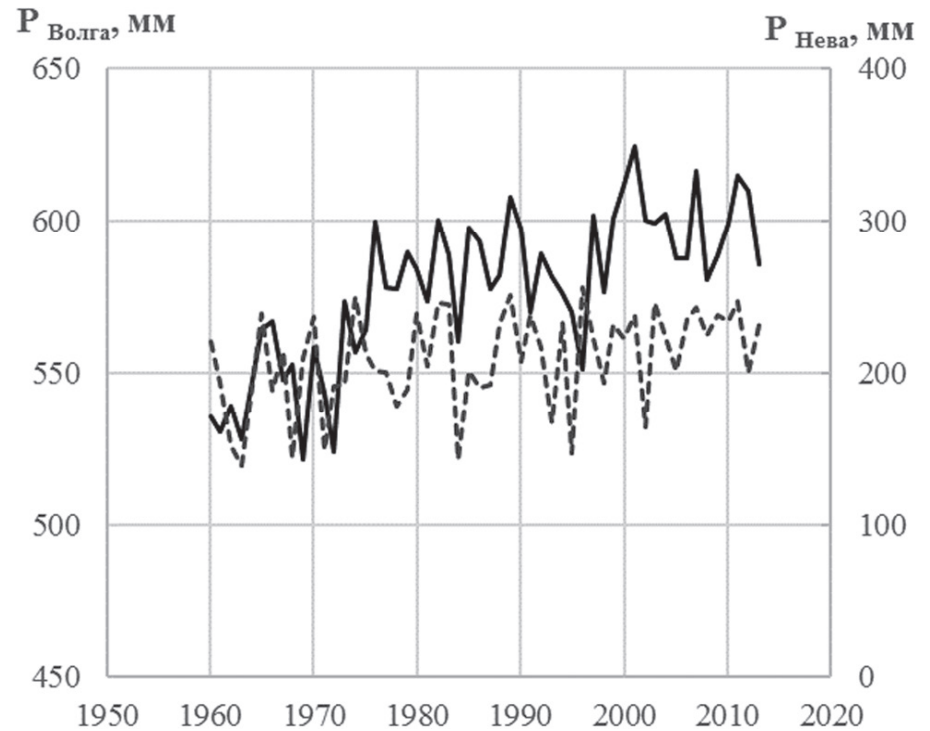
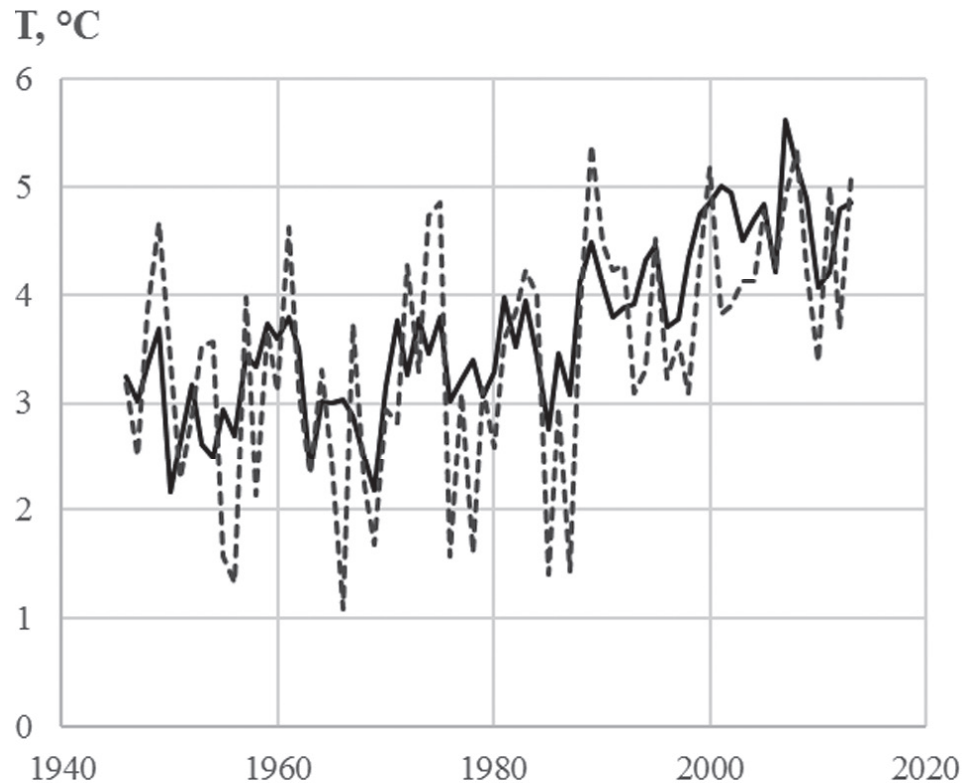
- **Прогнозирование внутривековых колебаний уровня Каспия выполнялось в рамках совместного анализа уравнения водного баланса моря и уравнения баланса влаги региона, включающего конкретный водоем и его бассейн, и путем проведения экспериментов с помощью МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН с целью исследования влияния Атлантического океана на формирование климатической изменчивости озер Европейской части России (ЕЧР).**
- **Была показано роль АТХЦ в формировании меридионального переноса тепла в высокие широты Северного полушария и тем самым воздействует на климат Евразии.**
- **Для характеристики интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой предложено использовались различные индексы атмосферной циркуляции.**

Оценена динамика среднегодовых температур и годовых сумм атмосферных осадков по территории бассейна Каспийского моря

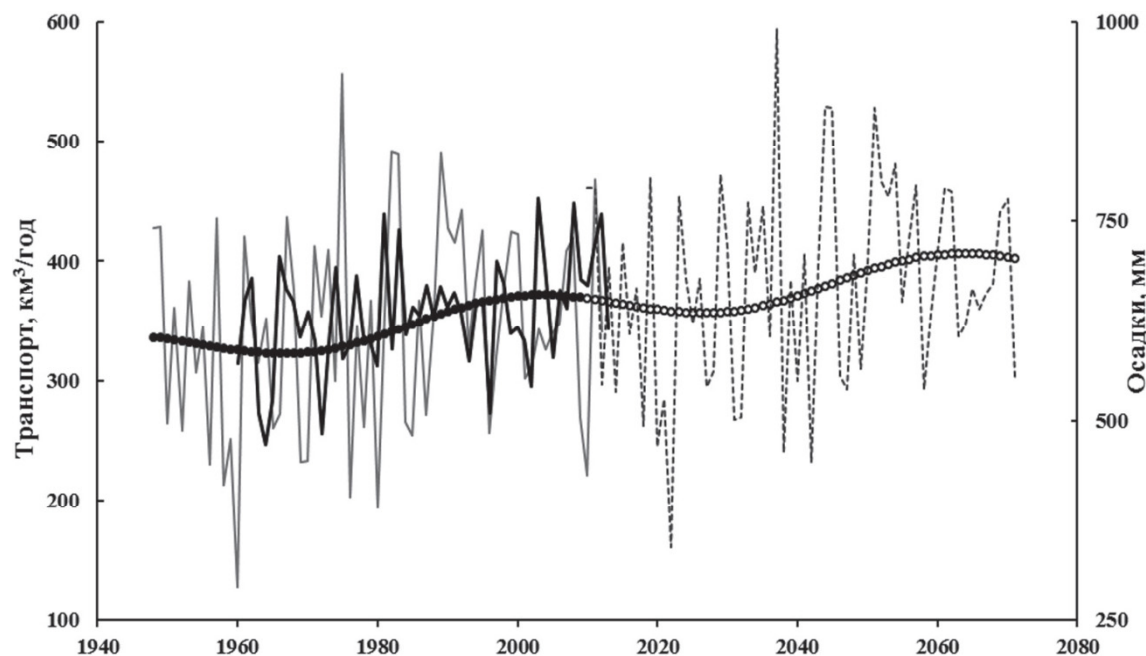


периоды подъема уровня (1978–1995 гг.) и его спада (1946–1977 гг. и 1996–2010 гг.)

Среднегодовые значения температуры воздуха (слева) и суммарные годовые осадки (справа) в бассейнах р. Волги (сплошная линия) и р. Невы (пунктирная линия) по данным 1946–2014 гг.



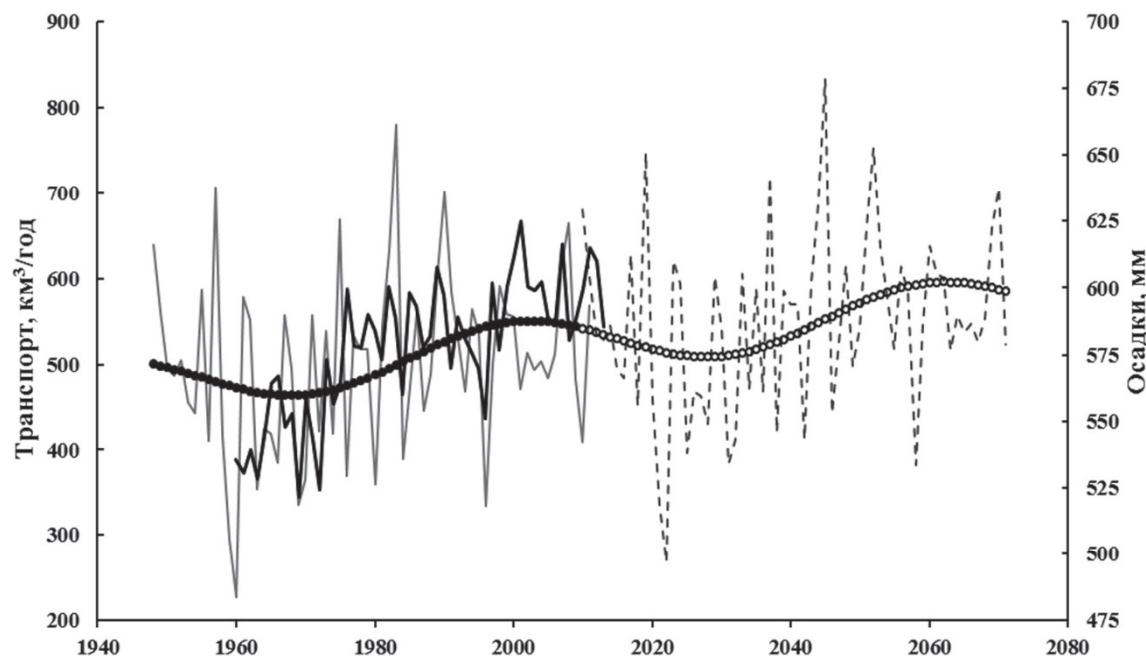
Динамика осадков согласуется с изменениями циркуляционных индексов. Эти данные представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые индексы атмосферной и океанской циркуляции в Северной Атлантике в качестве предикторов для совершенствования прогнозирования уровня режима крупных озер.



Изменения горизонтального транспорта влаги (км³/год) в XX столетии и прогноз его тенденций в XXI столетии :

а – поступление в бассейн р. Невы (26,5 в. д.),

б – поступление в бассейн р. Волги (35 в. д.).



Значения FT (черные точки), изменения ТВ (серая линии), атмосферные осадки на водосборе рек (жирная черная линия)

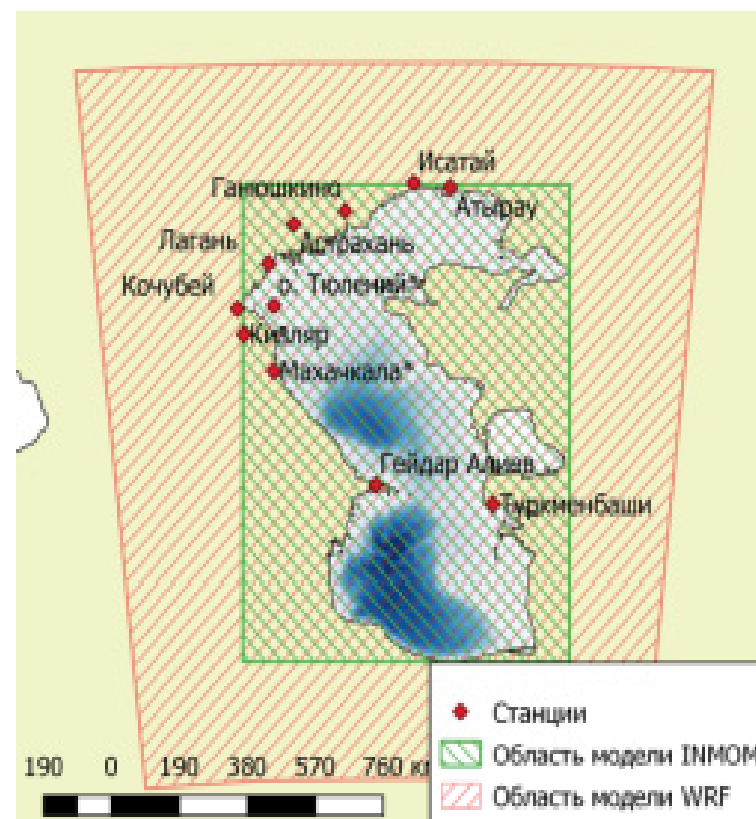
РЕЗУЛЬТАТЫ

- В настоящее время продолжается сокращение транспорта влаги из Атлантики на ЕЧР (в частности, в бассейн Волги и Невы).
- На этом фоне наблюдается уменьшение стока рек и падение уровня озер и Каспийского моря.
- В ближайшие 15–20 лет (примерно до 2035 г.) ожидается тенденция на снижение поступления влаги на ЕЧР. Следовательно, можно предположить, что в ближайшие несколько лет продолжится падение уровня Каспия и Ладожского и Онежского озер. Далее до 2070 г. ожидается новый период повышенного выноса влаги с Атлантики.

а) Блок-схема СОДИП для Каспия. б) Расчетные области моделей атмосферной циркуляции WRF и морской циркуляции INMOM и расположение станций для оценки точности прогнозов (станции, выделенные *, обозначают и метеорологические и гидрологические станции, остальные – метеорологические станции). Дианский и др, 2018



А)



б)

модель трехмерной гидро- и термодинамики для Каспия, воспроизводящую его изменчивость – от синоптической до климатической. (Р.Ибраев, Г. Дьяконов- ИВМ РАН)

:Численная модель Каспийского моря Сигма-Z-КОМПАС
(Сигма-Z-Координатная Океаническая Модель для Прогноза и Ассимиляции данных)

Описываемые процессы:

- Вихревые, волновые и струйные движения вод различного генезиса в широком пространственно-временном спектре (10-1000 км, минуты-годы);
- Апвеллинг и даунвеллинг;
- Массо-, тепло- и энергообмен моря с атмосферой;
- Внутри- и межгодовые колебания уровня вод;
- Изменения береговой линии и площади поверхности моря;
- Зимнее ледообразование;
- Конвекция.

Параметры модели:

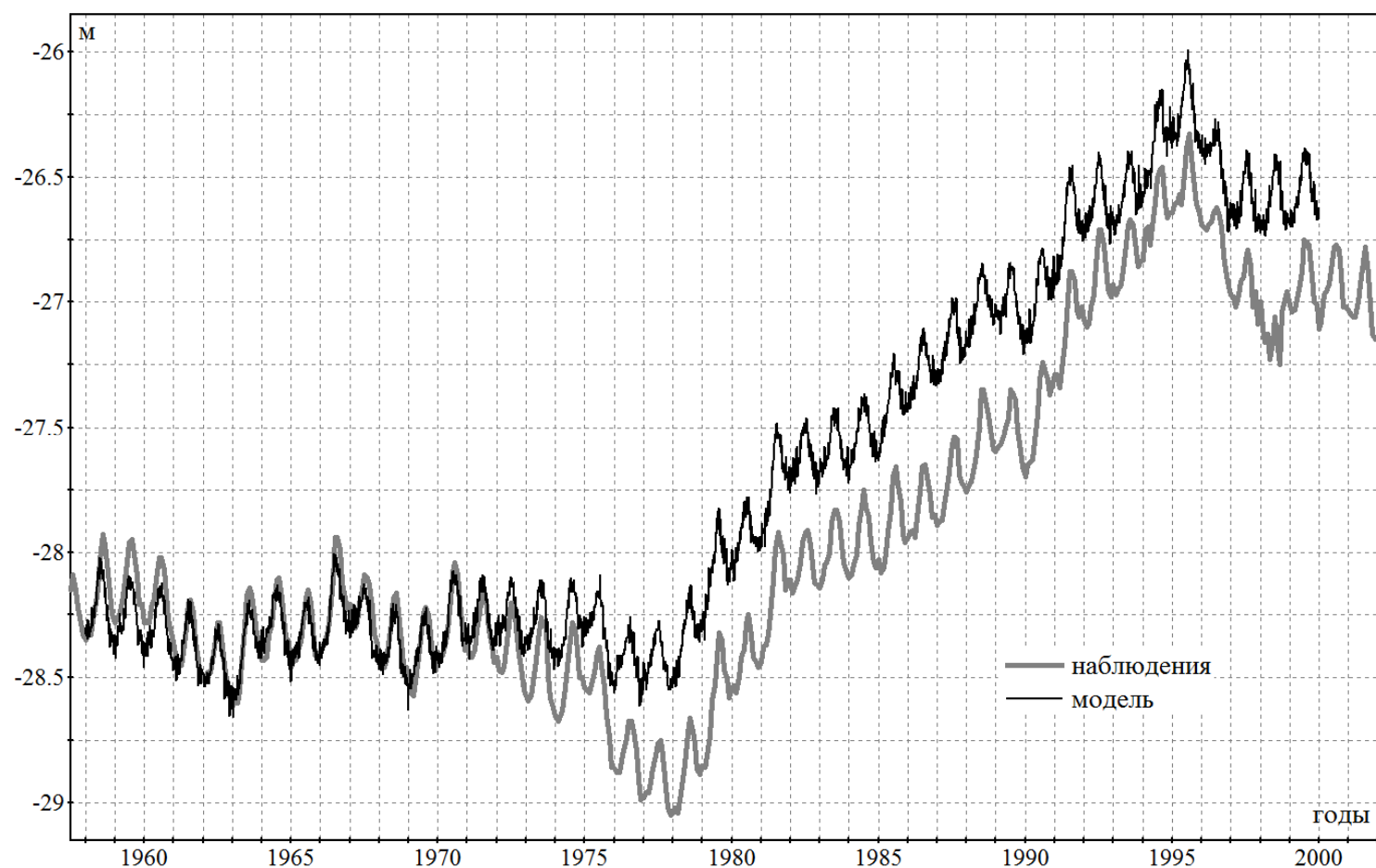
- Разрешение: ~ 4 км по горизонтали, от 2 до 30 м по вертикали, шаг по времени – 5 мин;
- Параметризация турбулентного перемешивания: по вертикали – схема Манка-Андерсона, по горизонтали – схема Смагоринского.

В модели учитываются:

- Реальный рельеф дна Каспия с детальным описанием мелководного шельфа;
- Сток основных рек: Волга, Кура, Урал, Терек и Сулак;
- Отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол;
- Реальный форсинг на поверхности моря: параметры приводного слоя атмосферы, потоки тепла, воды и импульса; используются данные реанализа ERA 40 с шагом 6 часов за период 1958-2001 гг.

ВОСПРОИЗВЕДЕНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

С использованием представленной модели проведена реконструкция циркуляции вод и эволюции уровня Каспийского моря в период 1958-2001 гг., а в дополнительной серии экспериментов исследована чувствительность многолетних трендов уровня к ряду естественных и антропогенных факторов, влияющих на водный баланс моря.



**Адаптация математической модели термогидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанной в Институте вычислительной математики РАН (Ибраев, 2008) для крупных озер
авт. С.Д. Голосов, И. Зверев**

- **ПРОБЛЕМА: дальнейшее развитие, использование моделей, разработанных под руководством Л.А. Руховца невозможно. Типичная для нас проблема – модели работают в «руках» создателя. Нет продукта.**
- **Поэтому поставлена и задача создать новую более совершенную модель, которая имеет определенные преимущества перед ранее разработанными моделями (Астраханцев и др., 2003; Руховец, Филатов, 2014). Поэтому за основу была адаптирована модель, разработанная в ИВМ Р. А. Ибраевым и адаптированная для пресных, стратифицированных озер С.Д. Голосовым (ИНОЗ РАН). В модели корректно задается форсинг (атмосферные воздействия), описывается ледяной покров, возможно использование кластеров для расчетов и др.**
- **Включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, замерзание, таяние) во льду и динамические процессы (движение, торошение и т.д.). В модели явным образом описываются потоки воды и ее свойств (соленость, теплосодержание) через боковые границы (сток рек и обмен через проливы) и поверхность раздела воздух-вода (испарение, осадки). В случае моделирования областей с открытыми границами на них ставятся условия излучения.**

Для Ладожского озера разработана 3-D модель экосистемы которая позволяет воспроизводить особенности концентраций и биомасс компонентов экосистемы в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации

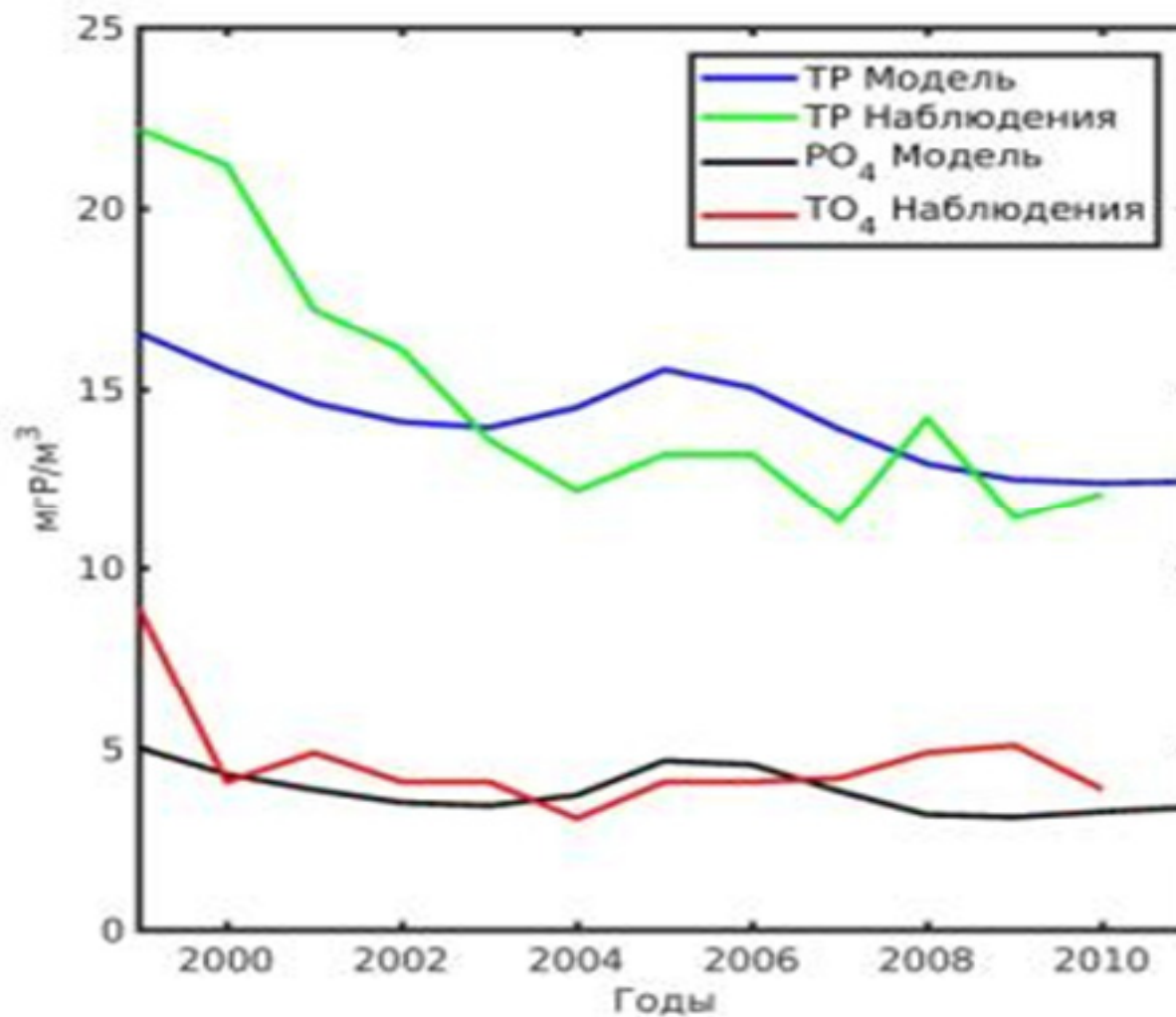
(Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н.)

- учитывается динамика биогенов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной**
- Одним из преимуществ предлагаемой модели является возможность анализировать состояние системы, биогеохимические потоки между различными формами**
- азота и фосфора.**
- Выполнены прогностические и диагностические расчеты по воспроизведению настоящего и будущего состояния экосистемы Ладожского озера за период с 1996 по 2040 гг.**

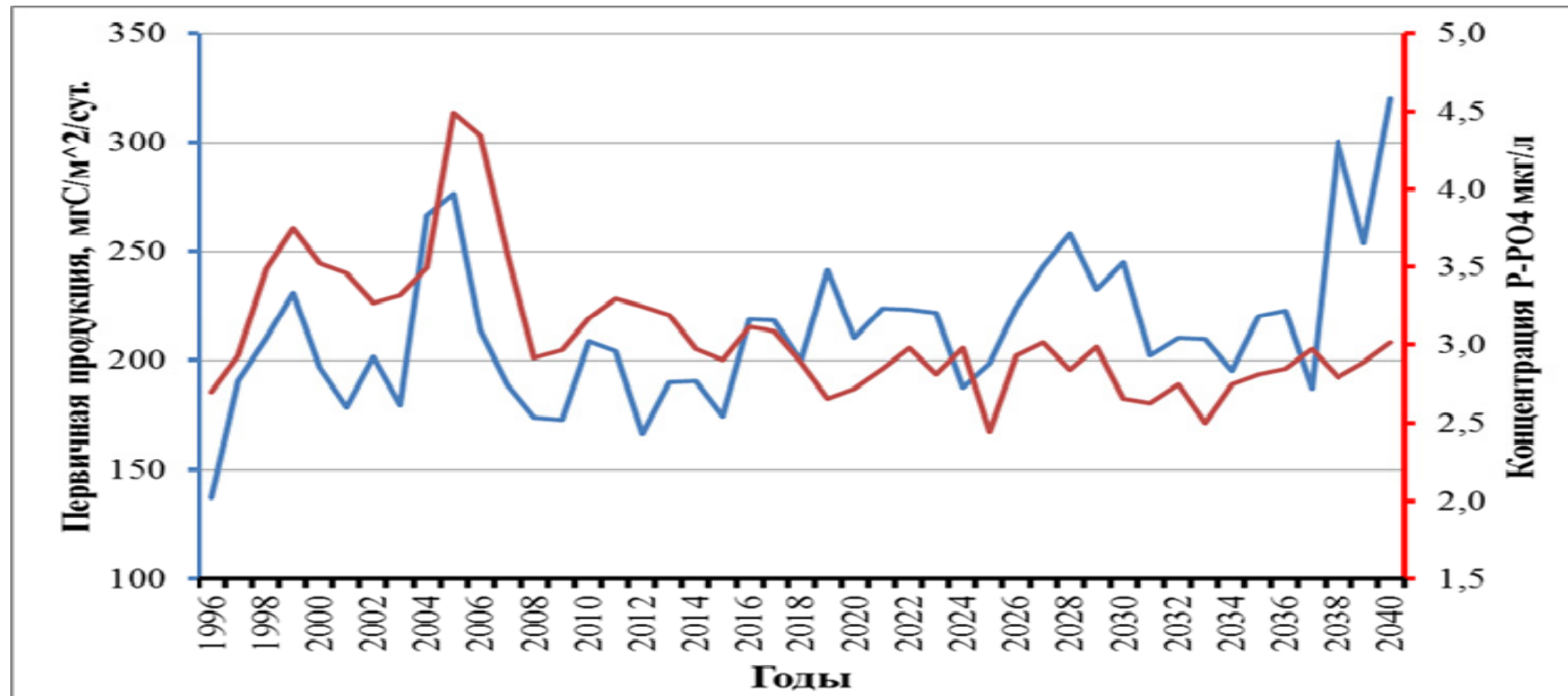


Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества.
НА основе подобной модели в ЕС создана система принятия решений
NEST для Балтики

Сравнение тенденций рассчитанных на модели и наблюдаемых средних за период открытой воды концентраций общего фосфора (TP) и фосфатов (PO_4) за период с 1999 по 2010 годы.



Межгодовая изменчивость средней за вегетативный период первичной продукции и концентрации фосфатов, по результатам моделирования. Оценки ПП при потеплении климата на 1.С



Начиная с 2020 года и до конца рассматриваемого периода, наблюдается увеличение первичной продукции. Среднее за вегетативный период значение первичной продукции осредненной за период 1996 – 2015 составляет 197 мгС/м²/сут. в будущем (2021 – 2040гг) значение первичной продукции возрастёт до значения 229 мгС/м²/сут.

ИЗДАНА КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

ДИАГНОЗ и ПРОГНОЗ
ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ
и ЭКОСИСТЕМ
ВЕЛИКИХ ОЗЕР РОССИИ

Авторы: Филатов Н.Н. (Отв. редактор),
Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А.,
Ибраев Р.А., Баклагин В.Н., Балаганский
А.Ф., Богданова М.С., Голосов С.Д., Гусев
А.В., Дьяконов Г.С., Ефремова Т.В.,
Зверев И.С., Исаев А.В., Коршенко Е.А.,
Махальская Н.И., Назарова Л.Е.,
Пальшин Н.И., Савчук О.П., Фомин В.В. ,
Фролов А.В.

Отмечу еще несколько разработок

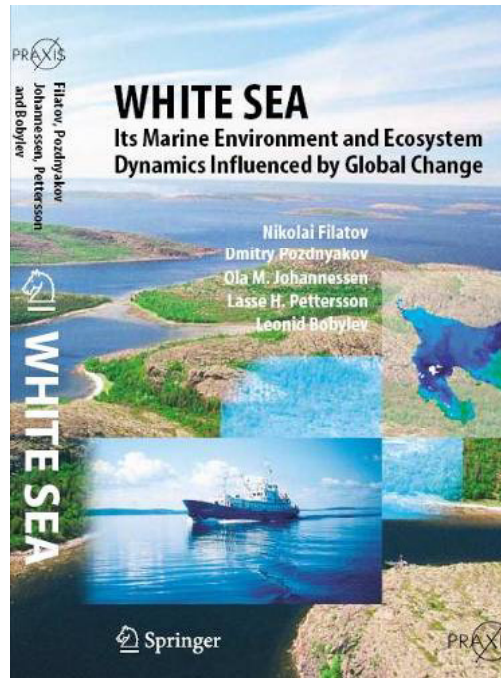
Озерная модель Flake

(<http://lakemodel.net>, <http://nwpi.krc.karelia.ru/flake>)

Разработана в рамках проекта INTAS-01-2132 (2002-2004), затем под эгидой проекта INTAS-Innovation-05-1000007-431 (2006-2008) была внедрена в систему численного прогноза погоды COSMO (Германия), в HIRLAM (Швеция), в унифицированную модель UK Met Office, в комплекс моделей Meteo France (Франция), т.е. во все центры ЧПП высокого разрешения в Европе. Кроме того, она внедрена в региональные климатические модели RCA и CLM.

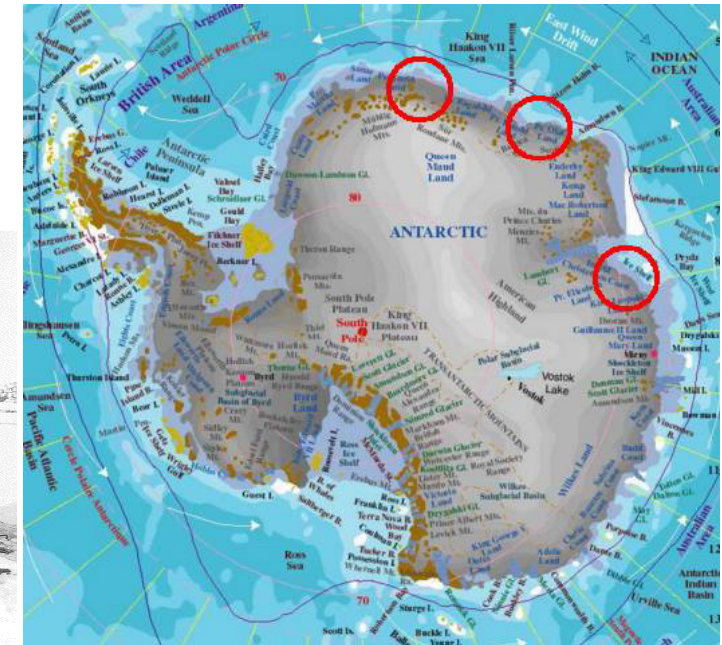
Модель может также быть использована как физический модуль в экосистемных моделях и др. Например, как блок модели экосистем Псковско-Чудского озера (Разработчик: ИВПС КарНЦ РАН, ИНОЗ РАН).

Исследования озер Восточной Антарктиды и Фенноскандии. Дать результаты



Результаты системных
Исследований
Белого моря.
Springer, 2005

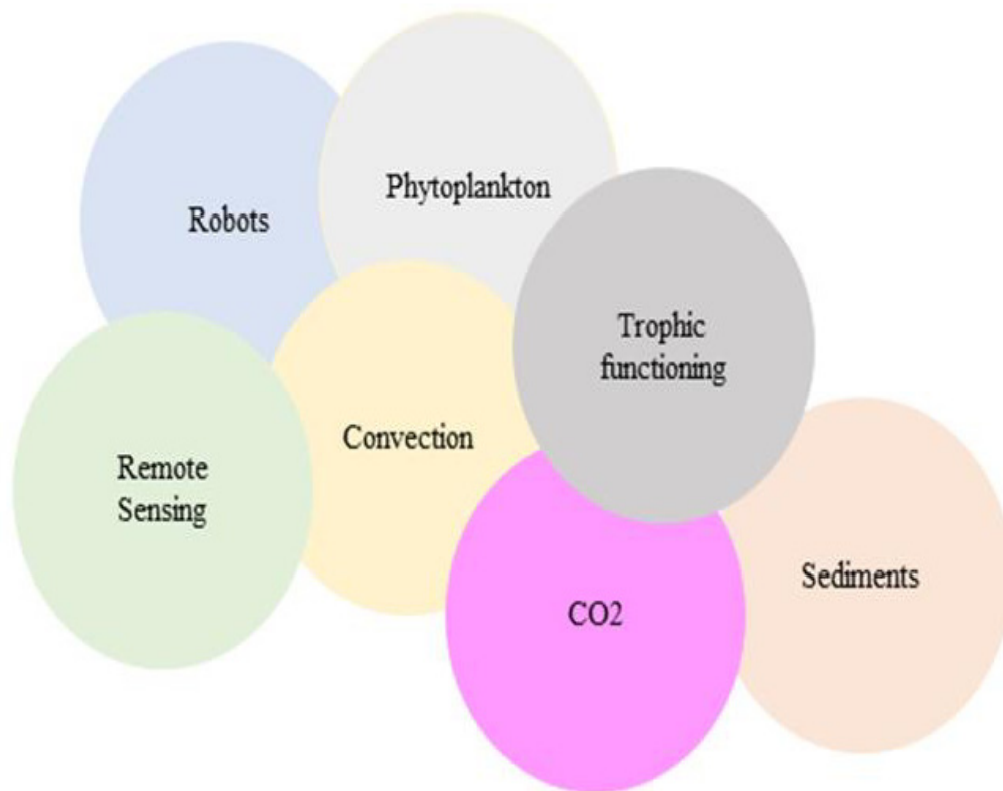
Зимние гидрофизические исследования



Комплексные исследования
27 Озер Антарктиды



Зимние эксперименты на озерах. Жизнь подо льдом». 2015-2018 гг.



Этот проект направлен на изучение зимней экологии системы крупнейших европейских озер (Ладожское и Онежское). Он в первую очередь задуман как синтез многоплановых междисциплинарных исследований, проводимых группой экспертов.

Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study

Alfred Wüest, Natacha Pasche, Bastiaan W. Ibelings, Sapna Sharma, Nikolay Filatov



Ice camp on Lake Onego, March 2017. © Hannah Chmiel, EPFL.

**По результатам проекта вышло
специальное издание в SIL
в журнале Inland Waters/**

**Сотрудничество между исследователями
различных дисциплин, от физики,
биогеохимии до биологии, позволило
лучше понять процессы, происходящие
подо льдом, которые определяют
функционирование этого большого
олиготрофного озера. Взаимодействие
между локальными региональными и
глобальными процессами определяет
статус этого большого европейского озера.**

Белое море состояние и изменения : эколого-социо-экономические проблемы



Современные проблемы Белого моря и водосбора

- Спад в экономике, свертывание градообразующих производств, упадок социальной инфраструктуры.
- Сокращение объёмов промысла за последние 20 лет водорослей – примерно в 5 раз, рыбы - в 17-20 раз, морских млекопитающих - в 10 раз. Сокращение численности населения.
- Беломорье можно рассматривать как модель Арктики, для калибровки и верификации разрабатываемых математических моделей термогидродинамики и экосистем, совмещенных с современными информационными базами данных, разработки социо-эколого-экономических моделей, создания систем поддержки принятия решений.
- Здесь можно отработать применение системного подхода в исследовании комплексных междисциплинарных социо-эколого-экономических проблем с использованием когнитивных моделей.

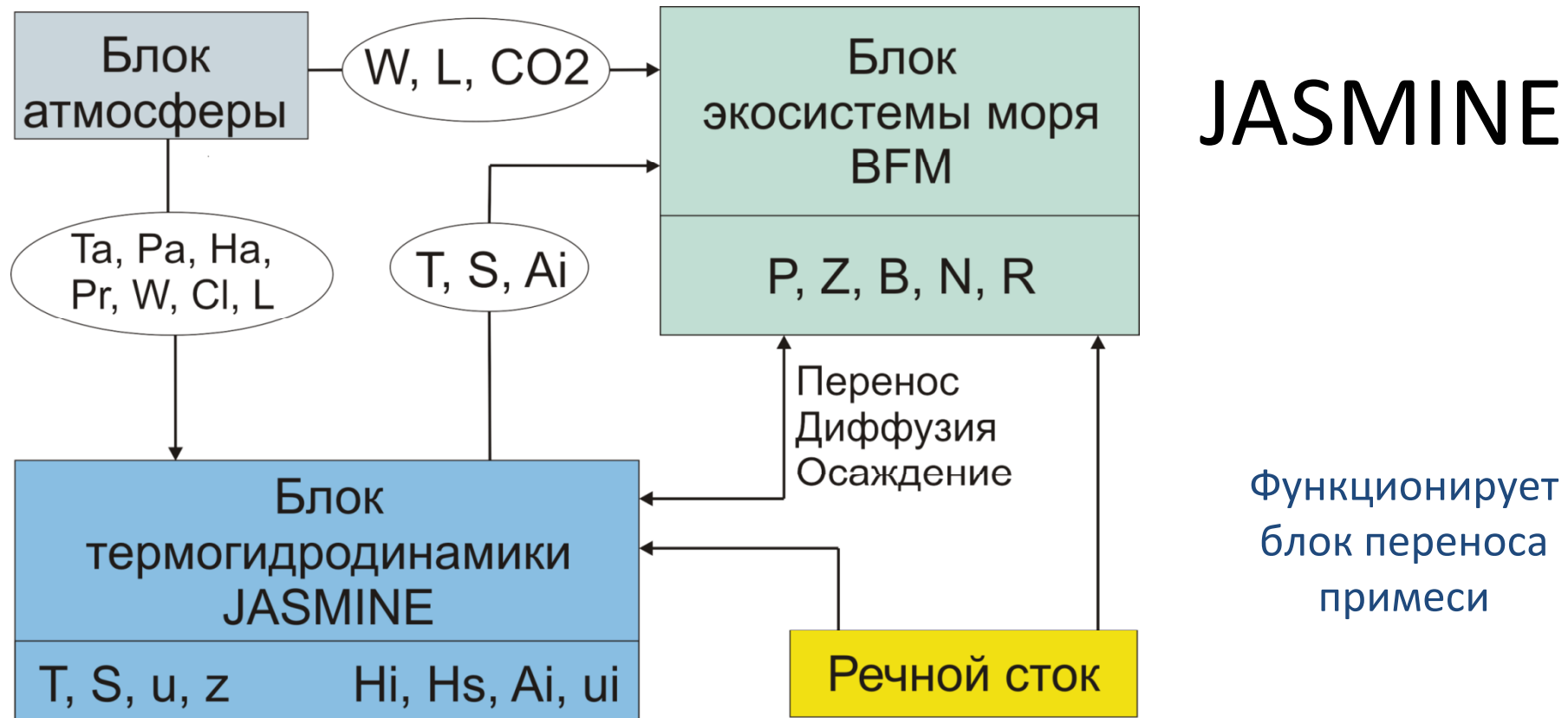
Актуальные задачи для решения проблем рационального использования и сохранения ресурсов Белого моря (Дымников В.П., Саркисян А.С.)

- Создать модель (модели) стандартный пакет программ - солвер – типа MOM или POM, но более «продвинутого», с хорошей моделью льда, новыми схемами, адаптивными сетками и т.д., чтобы использовать модель в качестве исследовательского инструмента.
- Иметь откалиброванные, верифицированные модели.
- Создать термогидродинамический блок, сопряженный с химико-биологическим блоком.
- Получить систему усвоения (ассимиляции) данных (САД) для использования их в экспертных системах (ЭС) по оценке состояния и прогноза изменений морей.
- ЭС может быть использована в задачах мониторинга, рационального использования и управления ресурсами морских и пресноводных объектов.
- Верифицированные по данным на Белом море модели ТГД и экосистемы в дальнейшем использовать для Северного Ледовитого Океана.

совместно ИВМ, ИППМ и ИВПС КарНЦ РАН активно реализуется создание системы

1. В качестве основы - численная модель общей циркуляции вод Северного Ледовитого океана FEMAO, разработанная в ИВМ РАН (Яковлев, 2009).
2. Форсинг - реанализ NCEP.
3. Динамика льда решена в русле моделей CICE (США) и LIM3 (ЕС, как блок NEMO), FESOM (Н.Г. Яковлев).
4. Блок моделирования экосистемы (BFM) [тестируется].
Имеется, разработанная ранее модель экосистемы (О.П. Савчук, И.А. Неелов).
5. Блок усвоения данных на базе библиотеки EnKF (ансамблевая фильтрация Калмана).
6. Блок переноса примеси.
7. Экосистемный блок – BFM (ЕС).

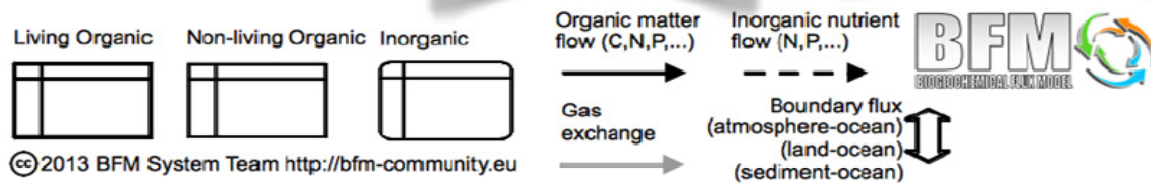
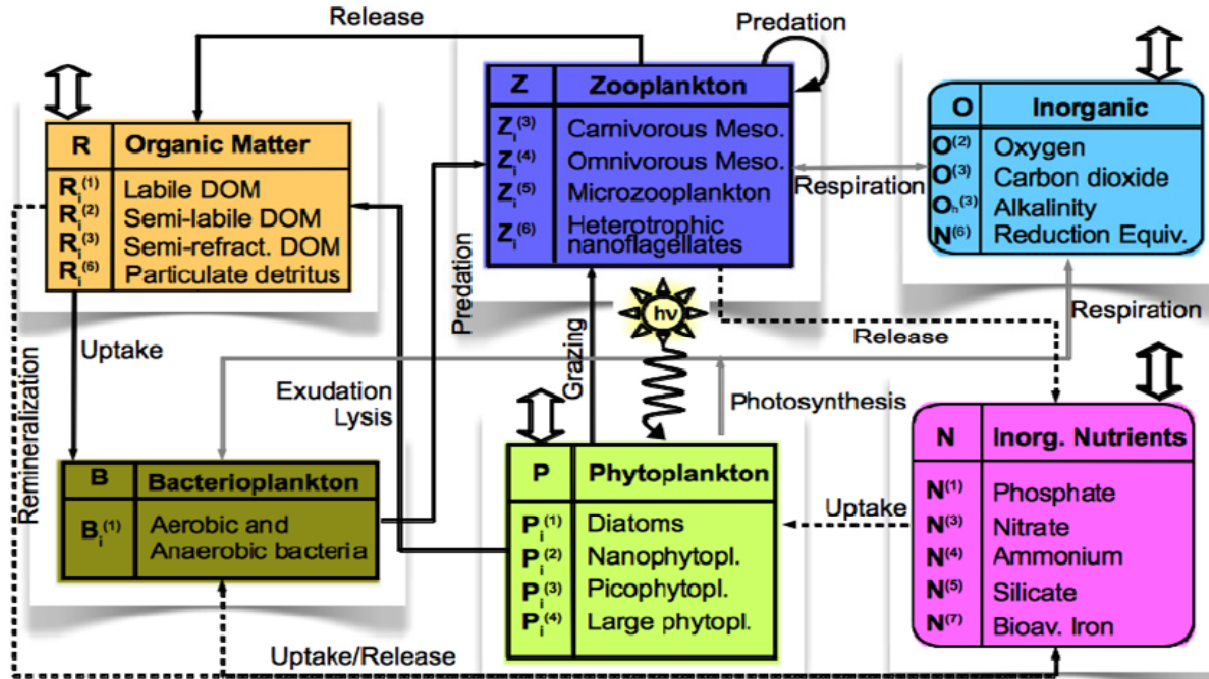
JASMINE



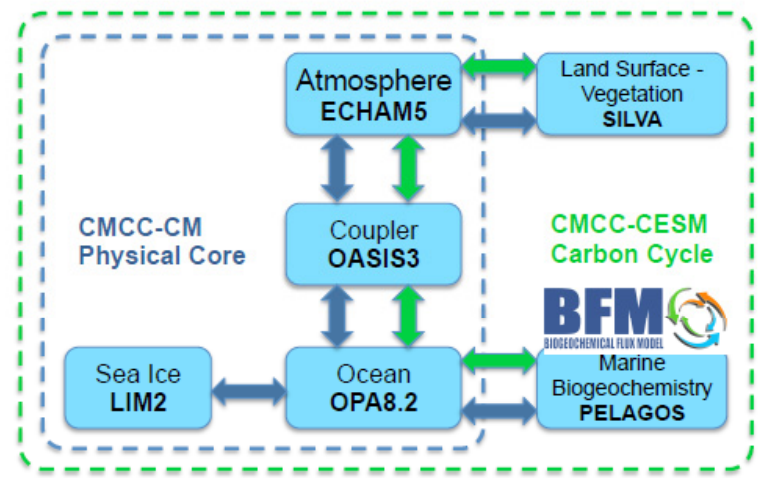
W - скорость ветра, L - освещенность, CO_2 - углекислый газ в атмосфере.
 T_a - температура воздуха, P_a - давление на уровне моря, H_a - влажность воздуха, P_r - осадки, Cl - облачность. T - температура воды, S - соленость, u - векторная скорость течений, z - уровень моря, H_i - количество льда, H_s - количество снега, A_i - сплоченность морского льда, u_i - векторная скорость дрейфа льда.

P - характеристики фитопланктона, Z - зоопланктона, B - бактериопланктона,
 N - концентрации биогенного неорганического вещества,
 R - концентрации и характеристики неживой органики

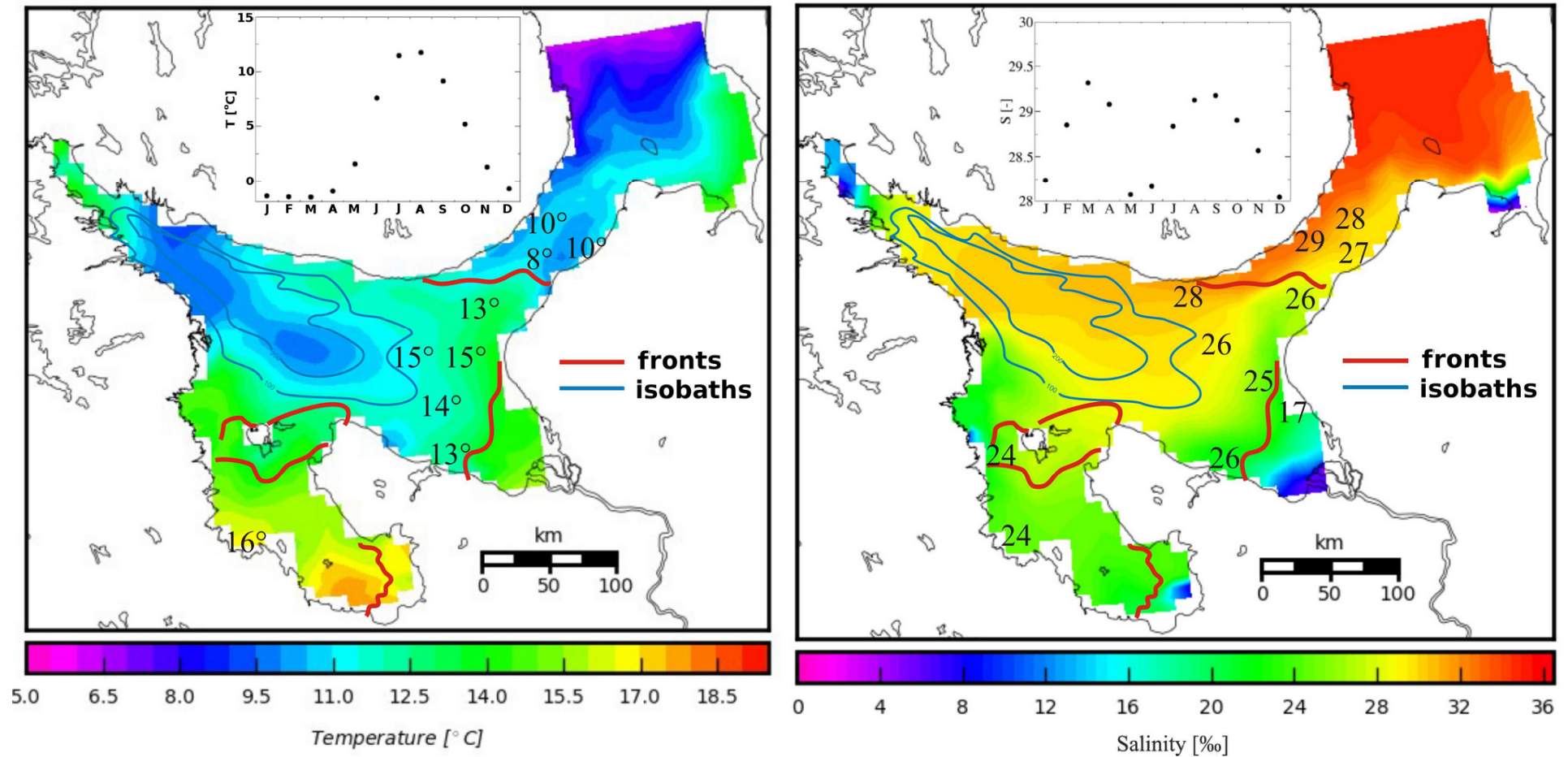
BFM



Agreement is based on the **NEMO** experience



Согласование измеренных и модельных данных

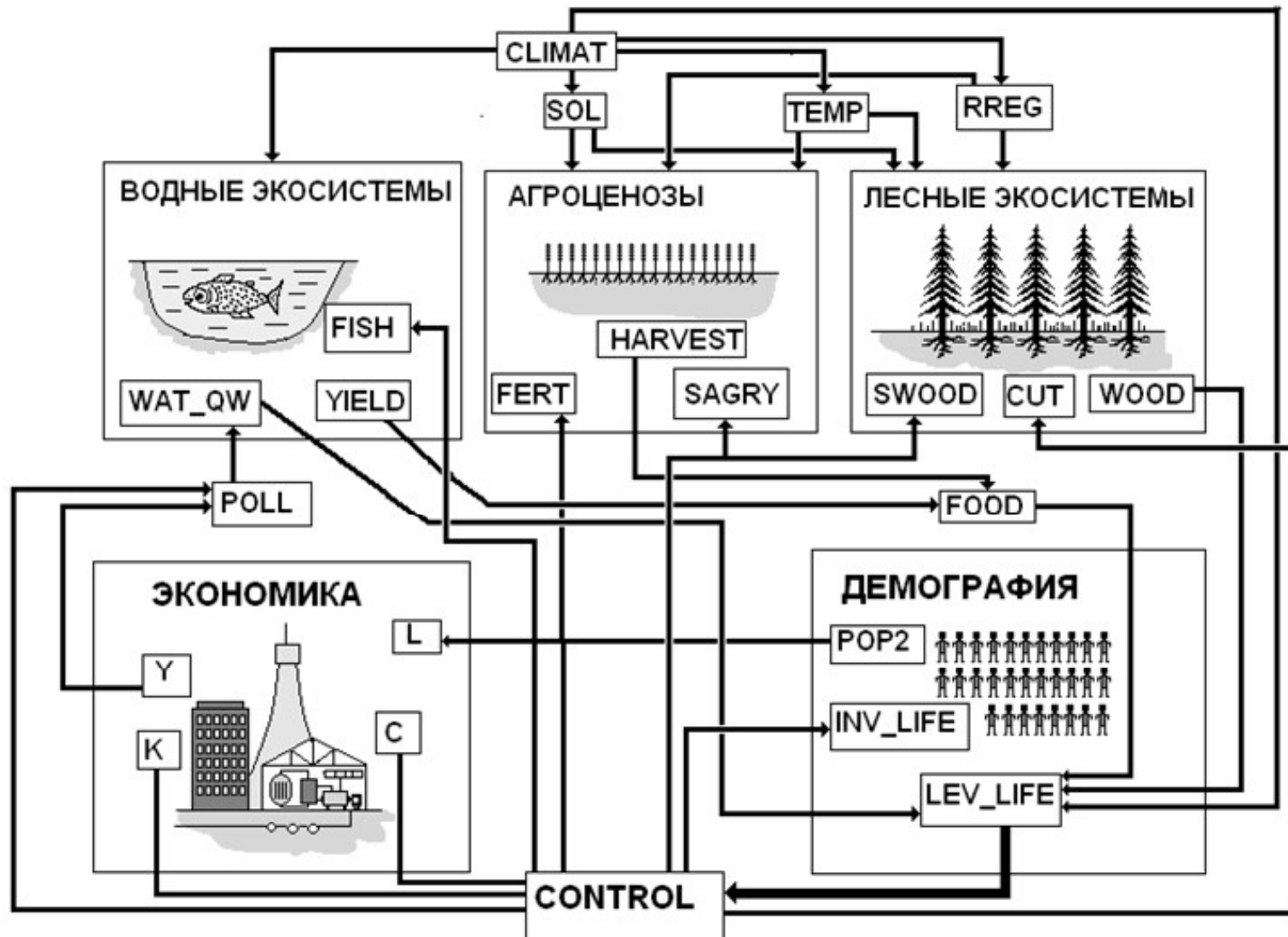


ИЗ: Chernov, I., Lazzari, P., Tolstikov, A., Kravchishina, M., Iakovlev, N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // Journal of Marine Systems, № 187 (2018) P. 23–35

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭКОЛОГО-СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
ПРОБЛЕМ БЕЛОГО МОРЯ И
ВОДОСБОРА**

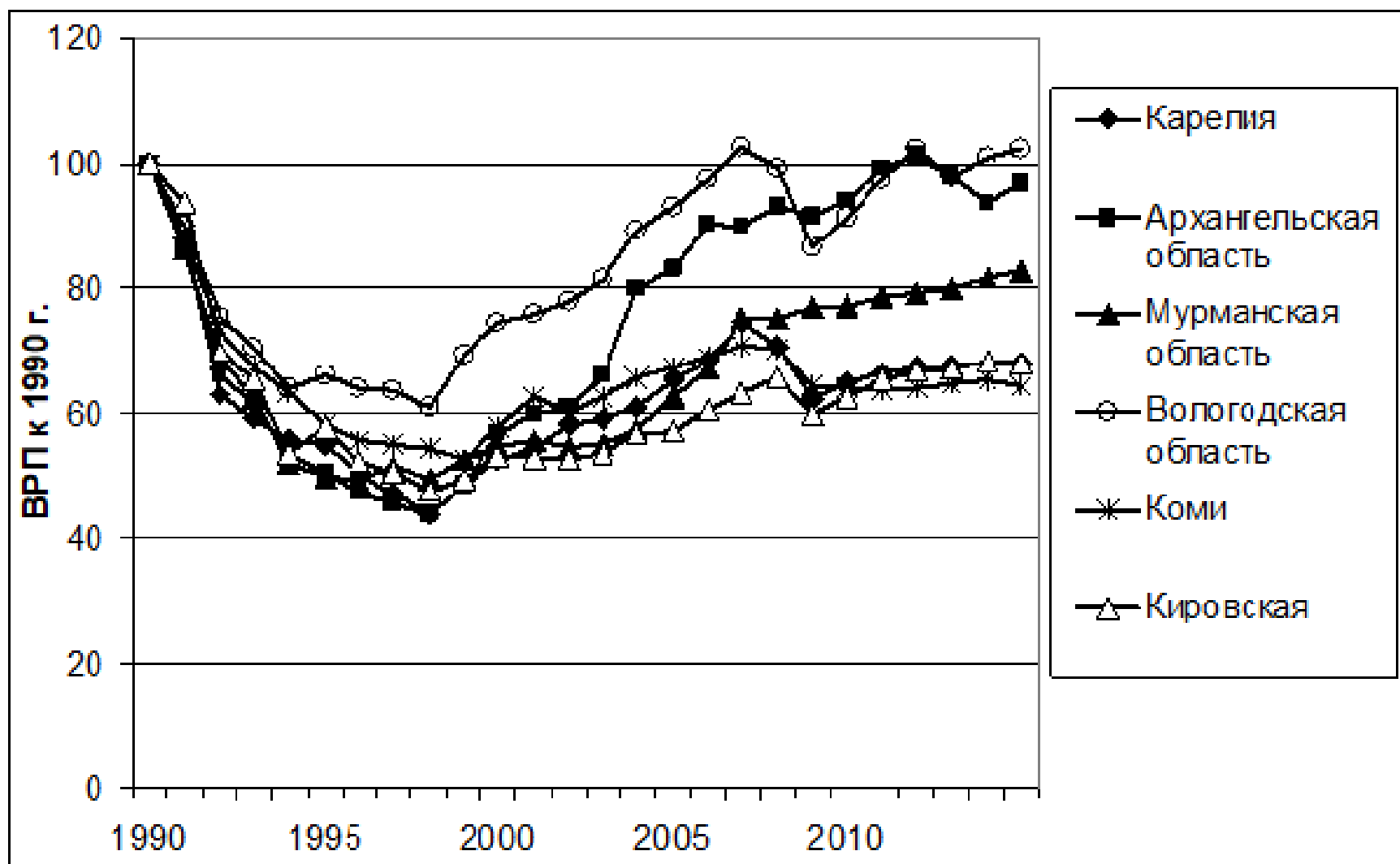
Когнитивные модели

Блоки социо-экономической системы Беломорья

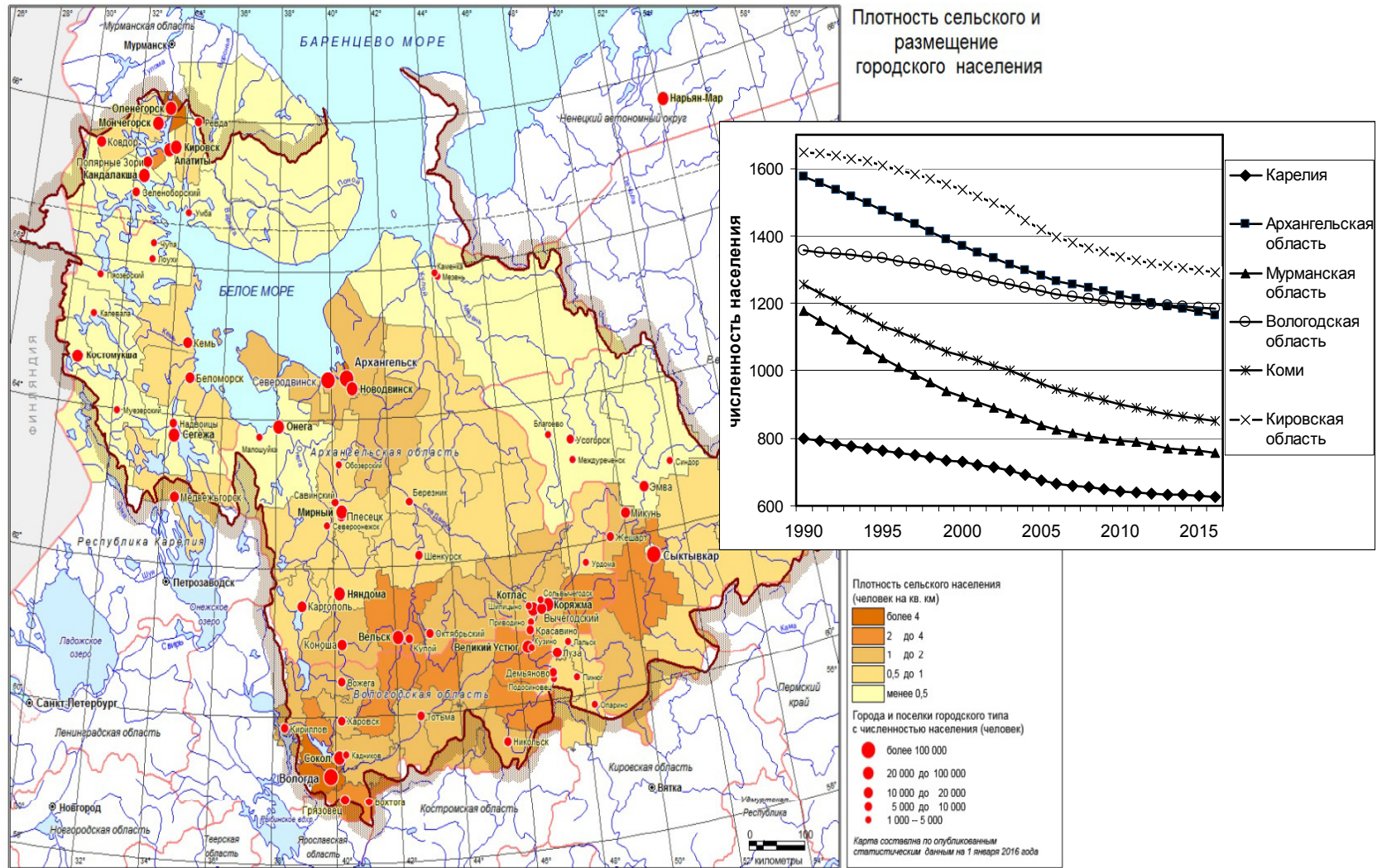


Учитывались разработки Воровича И. по Азовскому морю и его бассейну, Тимченко И.Е. по Черному морю, Меншуткина В.В. и др. по Финскому Заливу и др.

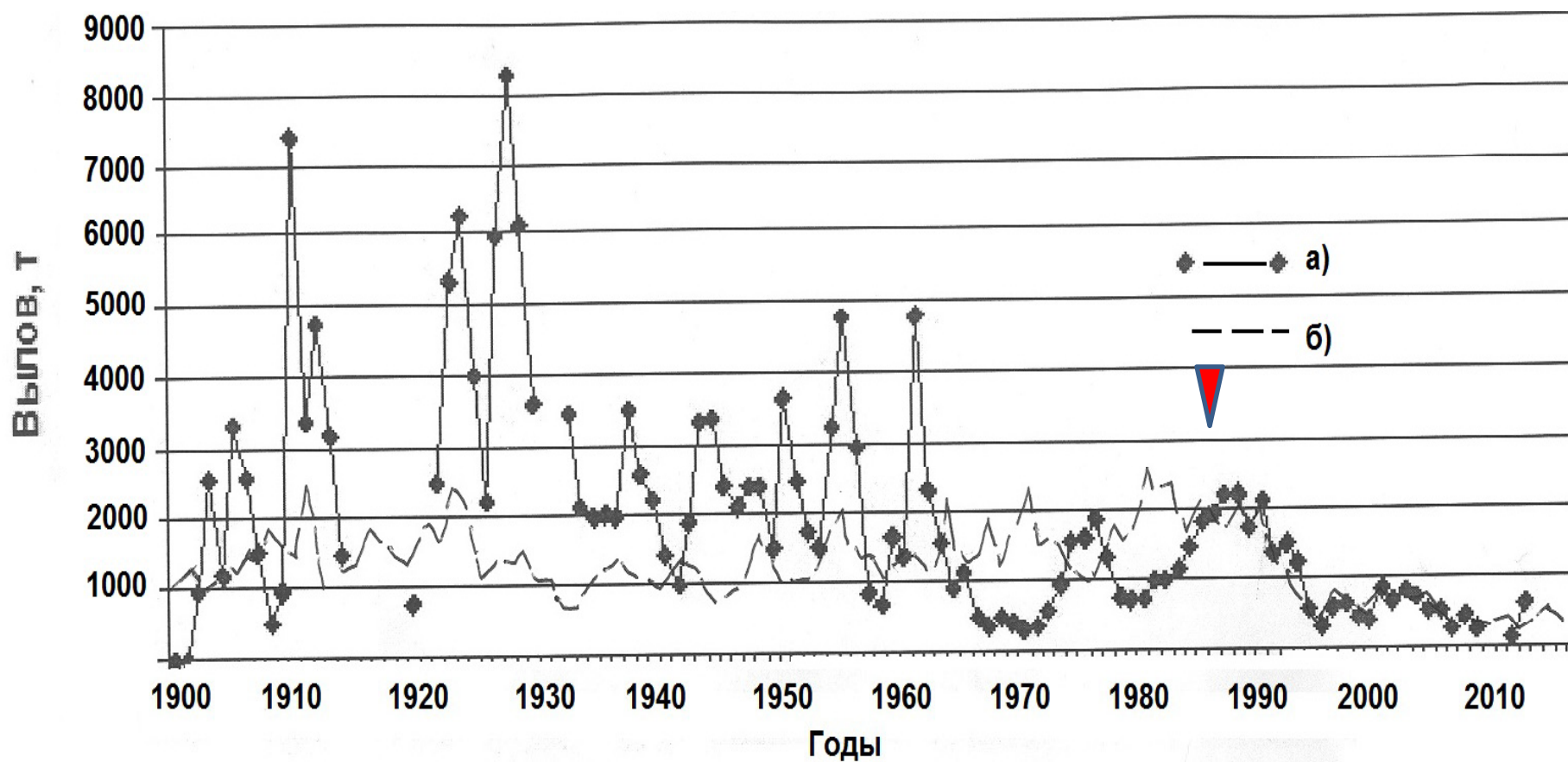
Динамика ВРП шести регионов, входящих в водосбор Белого моря (% к 1990 г.)



Население 1990-2017 гг. При общем падении численности населения отмечается рост городского населения и уменьшение сельского



Вылов сельди (а) и наваги (б) в Белом море с 1900 по 2013 г. (до 1990 г. запас рассчитан на основании фактических уловов, после – экспертных данных).
Построен по данным работ [Стасенков и др. 2012; Стасенков, 2017].



МОДЕЛЬ СОСТОИТ ИЗ БЛОКОВ:

Экосистемы – воспроизведением процессов продуцирования органического вещества и его передача по трофической сети водоема до биомассы популяции промысловой рыбы в море.

Климат - описание и сценарное прогнозирование изменения климатических условий.

Экономика предназначена для описания динамики валового регионального продукта (Y). Кроме этого, валовый продукт расходуется на изменение уровня жизни населения (LEV_LIFE) и воздействия на сопряженные подсистемы).

Демография, Сельское хозяйство), Лесные экосистемы -

Управленческий - посвящена описанию и разработке механизма централизованного управления.

Цель управления заключается в достижении существования всей эколого- социально-экономической системы при различных сценариях изменения климатических условий.

Интерфейс модели программы эколого-социо-экономической системы Беломорья.

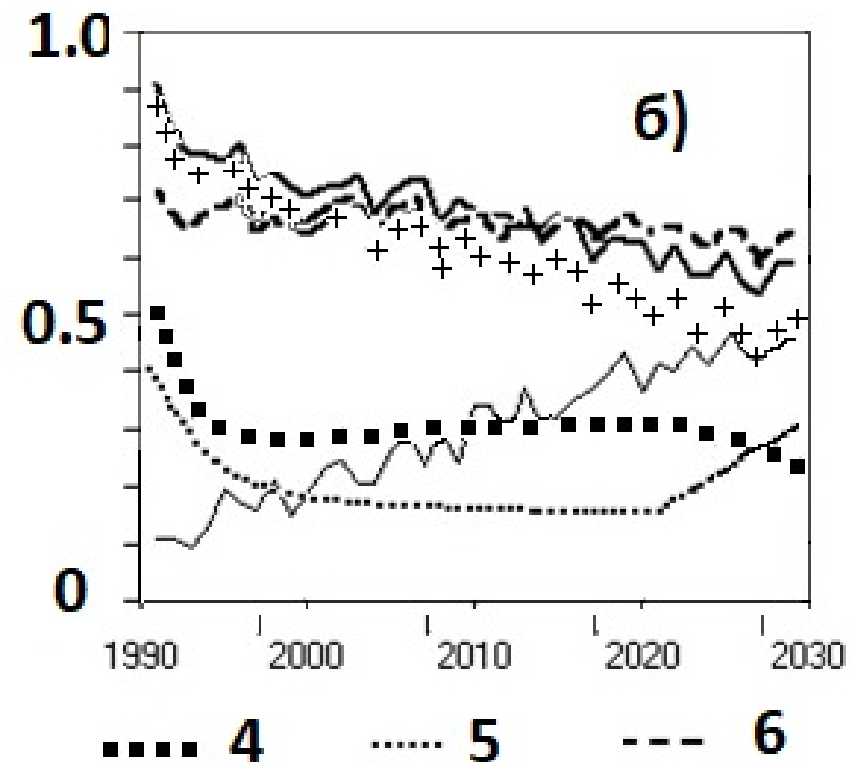
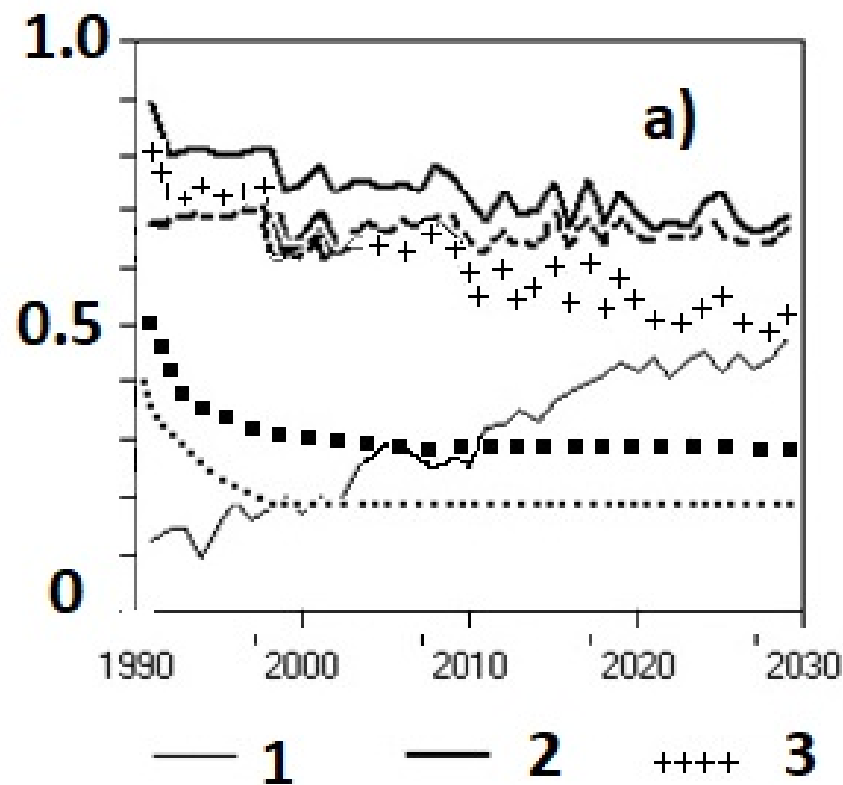
ECOLOGY-ECONOMIC MODEL

INITIAL BEGIN GRAPH PHASE END

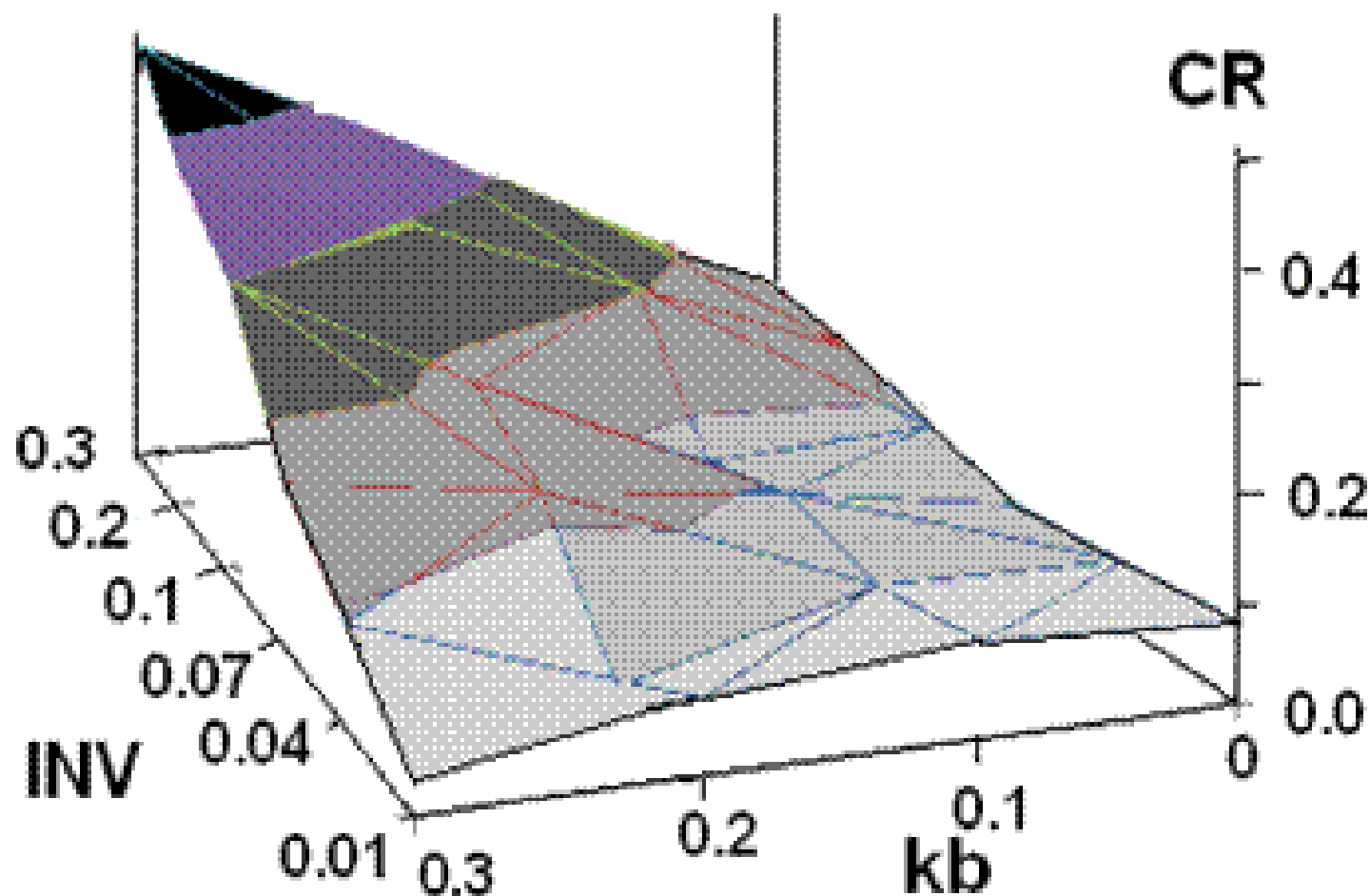
0,4	alfa	,08	Y	валовой региональный продукт	0,2	FISH	усилия рыболовства
0,01	kappa	,57	K	производственные фонды	0,5	CLIMAT	климатические
0,03	nu	,05	L	рабочая сила	0,5	SOL	солнечная радиация
0,8	mu	,04	INV	инвестиции в развитие фондов	0,5	RREG	осадки
0,5	ro	,04	c	прочие инвестиции	0,5	TEMP	температура воздуха
0,05	beta	,03	BIRTH	рождаемость	0,1	CUT	вырубка леса
0,8	KPOLI	,75	LEV_LIFE	уровень жизни населения	0,1	FERT	удобрение сельхоз культур
		48,39	age	средняя продолжительность			
		,03	NH18	числю.18-ти летних	,59	WAT_QW	качество воды
		,05	NH25	числ. 25-ти летних	,06	POPUL	численность населения
		,06	NH45	числ. 45-ти летних			УПРАВЛЕНИЕ
		,09	NH65	числ. 65-лет.	,16	BIOM	биомасса деревьев
		,06	POP2	числ. 18 - 65	,55	ORGANIC	лесной опад
		,05	zoo	зоопланктон	,02	NDEP	азот в почве леса
		,74	benthos	бентос	,02	WOOD	вывоз древесины
		,54	eggs	икра	,17	LEAF	листья растений
		,02	YIELD	вылов рыбы	,03	ORGANICA	мертвая органика
		,19	N0	сеглетки	,31	NITRO	азот в почве поля
		,13	N1	годовики	,09	ROOT	корни растений
		,11	N2	двухлетки	,15	PHOTOSYNA	фотосинтез растений
		,05	N3	трехлетки	,17	HARVEST	урожай сельхоз культур
		,02	N4	четырёхлетки			
		,01	N5	пятилетки			

TT 98

Изменения характеристик экосистемы Белого моря 1990—2030гг. при инерционном сценарии инвестирования (а) и при увеличении инвестиций после 2018г. (б): 1— интегральная температура воды, 2— содержание фосфатов, 3— фитопланктон, 4— рыбные запасы, 5— уровень загрязнения моря, 6— зоопланктон

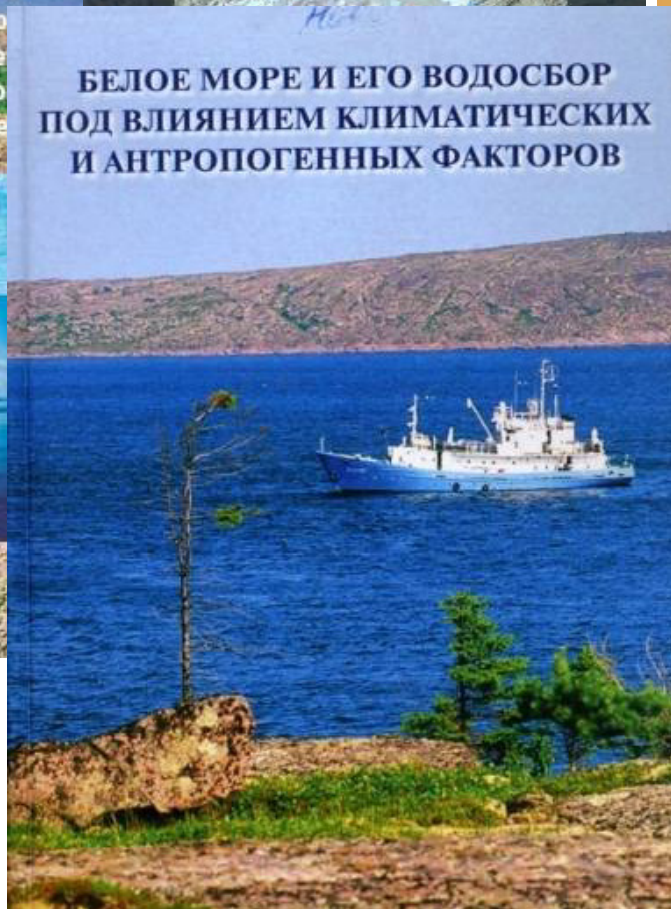
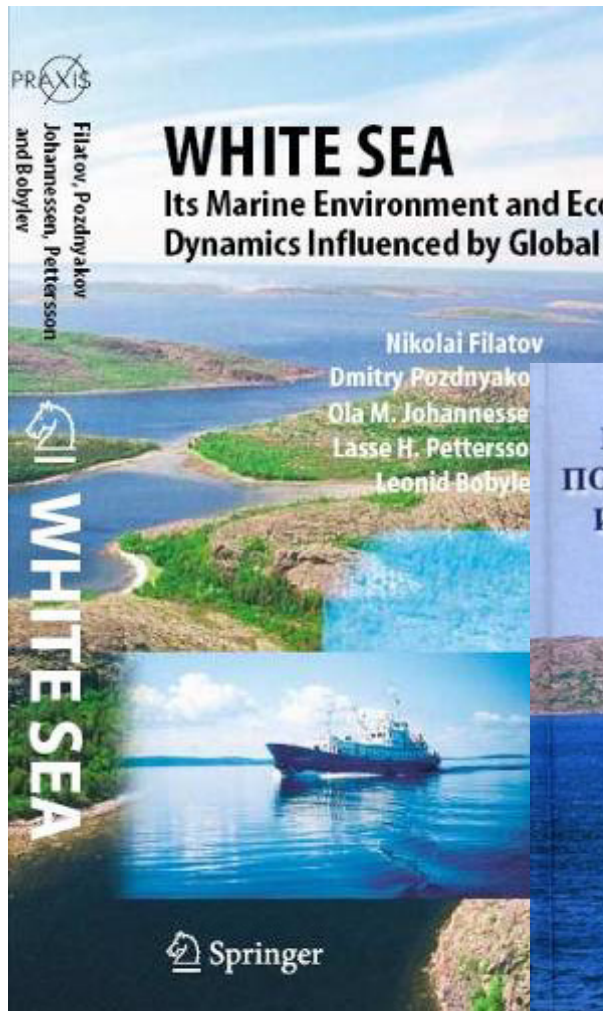


Зависимость критерия уровня жизни населения регионов на водосборе Белого моря CR от суммарных инвестиций INV и темпов прироста численности населения kb



**Белое море и его водосбор
(Беломорье) могут быть своеобразным
полигоном для отработки решений
разнообразных фундаментальных и
прикладных проблем, задач обороны,
транспорта, энергетики, социально-
экономического развития Севера, освоения
ресурсов Арктики.**

По результатам комплексных системных исследований опубликованы



АРКТИКА

ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА



Благодарю коллег ИВМ, ИО РАН :

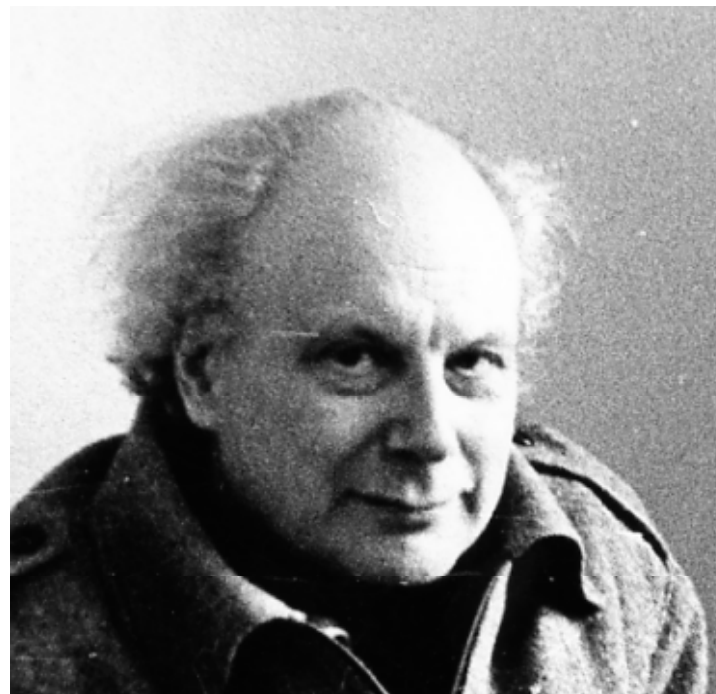
:



Я благодарю моих коллег за совместную работу



**Руховец Леонид Айзикович -
профессор, д.ф-м.н.,
Быв. Директор Санкт-Петербургского
экономико-математического института
РАН,
1936—2014**



**Меншуткин Владимир Васильевич -
профессор, д.б.н., г.н.с. СПб ЭМИ РАН,
ИПРЭ РАН**

НЕКОТОРЫЕ НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Каково соотношение климатических и антропогенных факторов на экосистемы озер.

Долгосрочный прогноз уровня воды Каспия.

Не используются современные математические модели, системы поддержки принятия управленческих решений (Пример оз. Байкал, когда в условиях маловодья 2015-2018 гг. пришлось принять решение по регулированию уровня воды озера путем Постановления Правительства РФ).

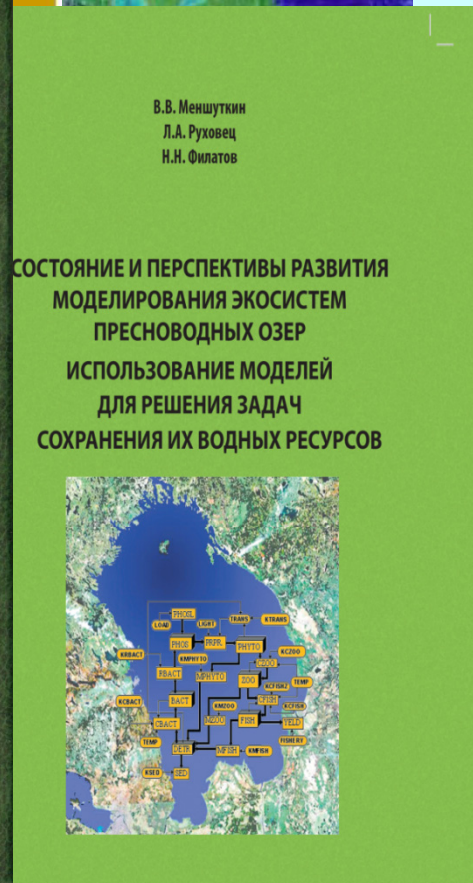
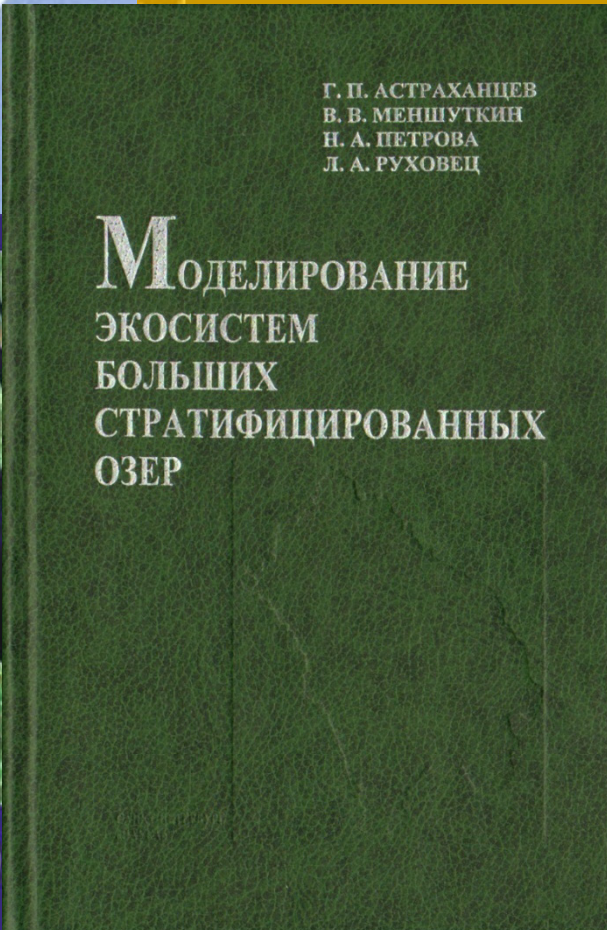
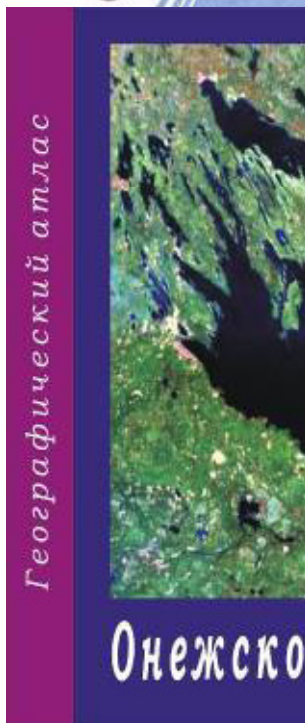
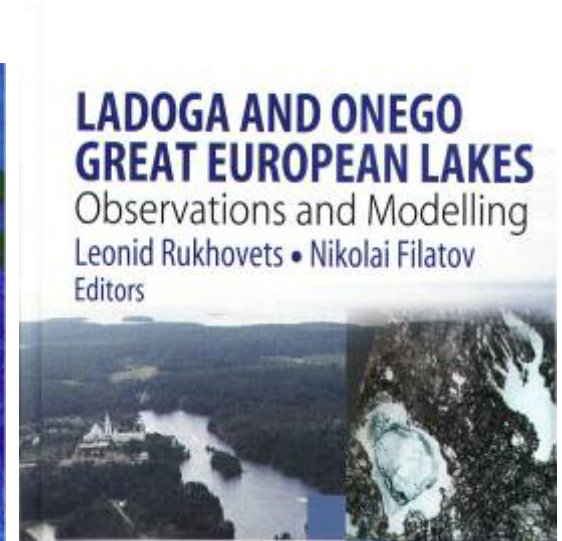
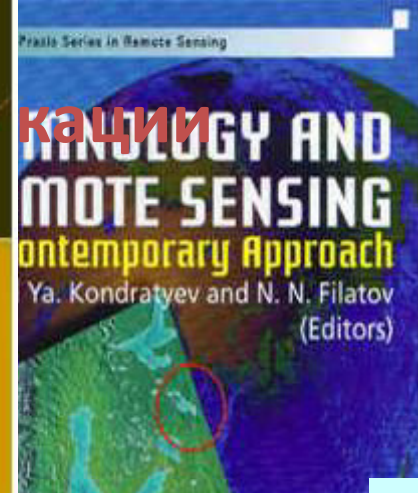
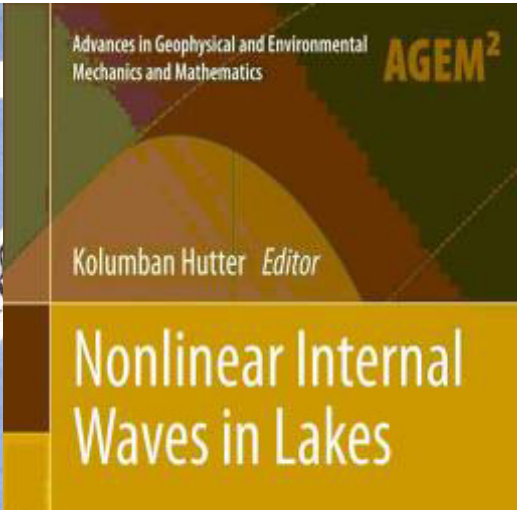
Нет корректного понимания роли озер с ледовым покровом в выбросах парниковых газов в глобальном углеродном балансе.

Отсутствуют конкурирующие школы специалистов по моделированию экосистем внутренних водоемов.

Несовершенна система мониторинга озер и др. внутренних водоемов.

Устарела приборная база и флот для экспериментальных исследований озер.

Проблема сохранения водных ресурсов планеты гораздо более актуальна, чем проблема обеспечения углеводородами. Водные ресурсы больших стратифицированных озер в особенности нуждаются в защите, т. к. нарушение устойчивости их экосистем может иметь долговременные и дорогостоящие отрицательные последствия.



Спасибо за внимание!



С НИС «Эколог» выполняются исследования Ладоги, Онего, Выгозера, ББК, Белого и Балтийского морей