Моделирующая система для оценки и прогноза тепло и массопереноса в системе «водосбор-водоток-водоем»

Кондратьев С.А., Мельник М.М., Голосов С.Д., Шмакова М.В.,
Зверев И.С., Шипунова Е.А.

О дальнейшем развитии российско-эстонского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных водных объектов
Псков, 1.07.2019

Фрагмент триптиха Иеронима Босха «Сад земных наслаждений», наглядно иллюстрирующий основные источники загрязнения системы водосбор — водоток — водоем

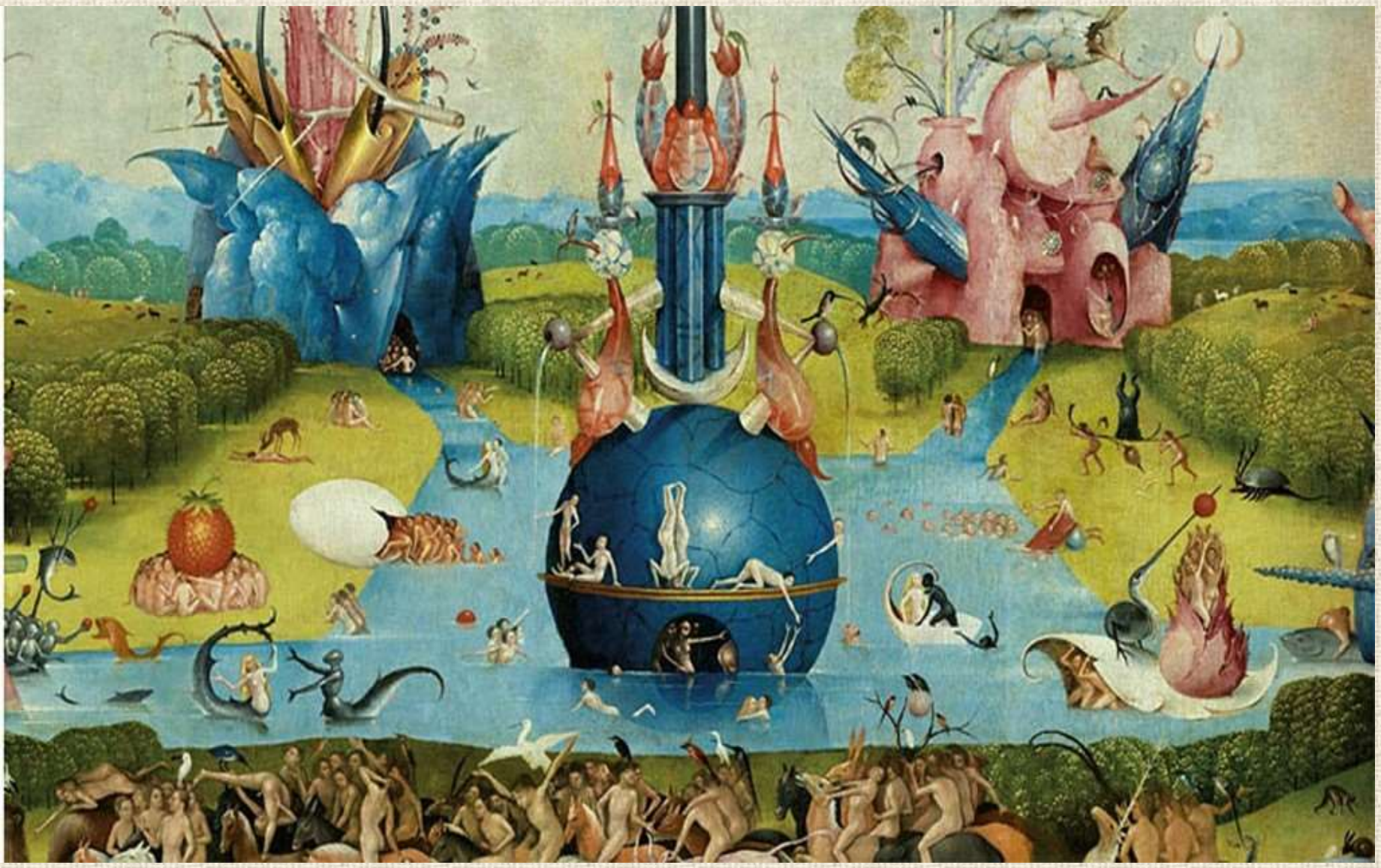


Схема формирования антропогенного воздействия на водные объекты в современных условиях

Математическая модель – формализованное представление существующих знаний о закономерностях и особенностях развития изучаемых природных систем и отдельных процессов в виде математических выражений. Одним из основных предназначений моделей является получение новой информации об описываемых системах и процессах, когда натурные наблюдения затруднены или невозможны.

Система моделей

Водосбор

- Модель формирования стока *IL_HM*
- Модель выноса химических веществ *IL_LM*

Водоток

- Модель твердого стока рек *IL_SR*
- Модель русловой гидродинамики транспорта наносов и растворенных примесей *IL_MTRiver*

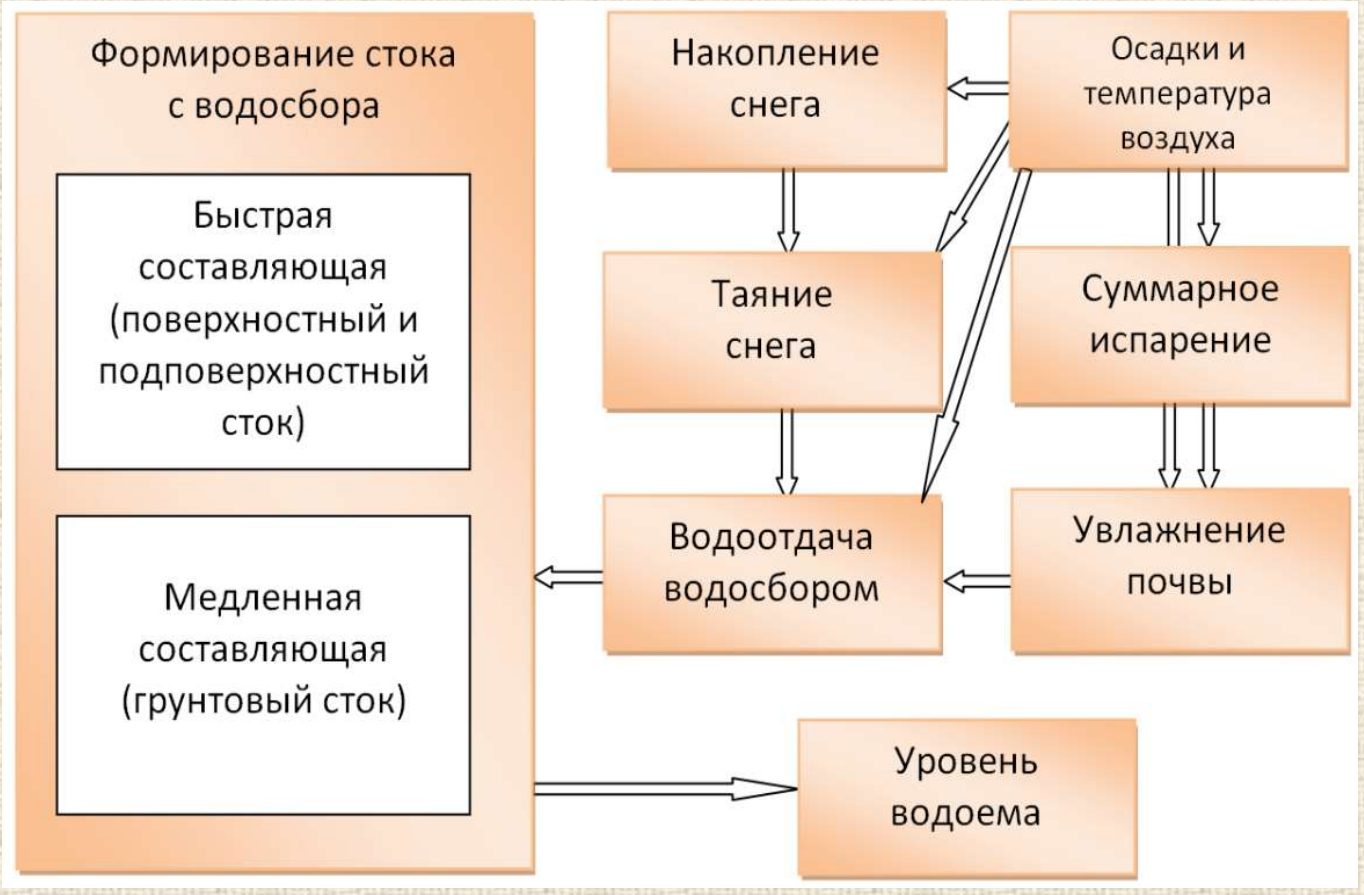
Водоем

- **1-D** модель теплового режима и перемешивания в водоёме *FLake*
- **1-D** модель динамики неконсервативной примеси *FLakeEco*
- **2-D** модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме *IL_MTLake*
- **3-D** модель гидро-термодинамики внут-реннего моря *МГВМ*

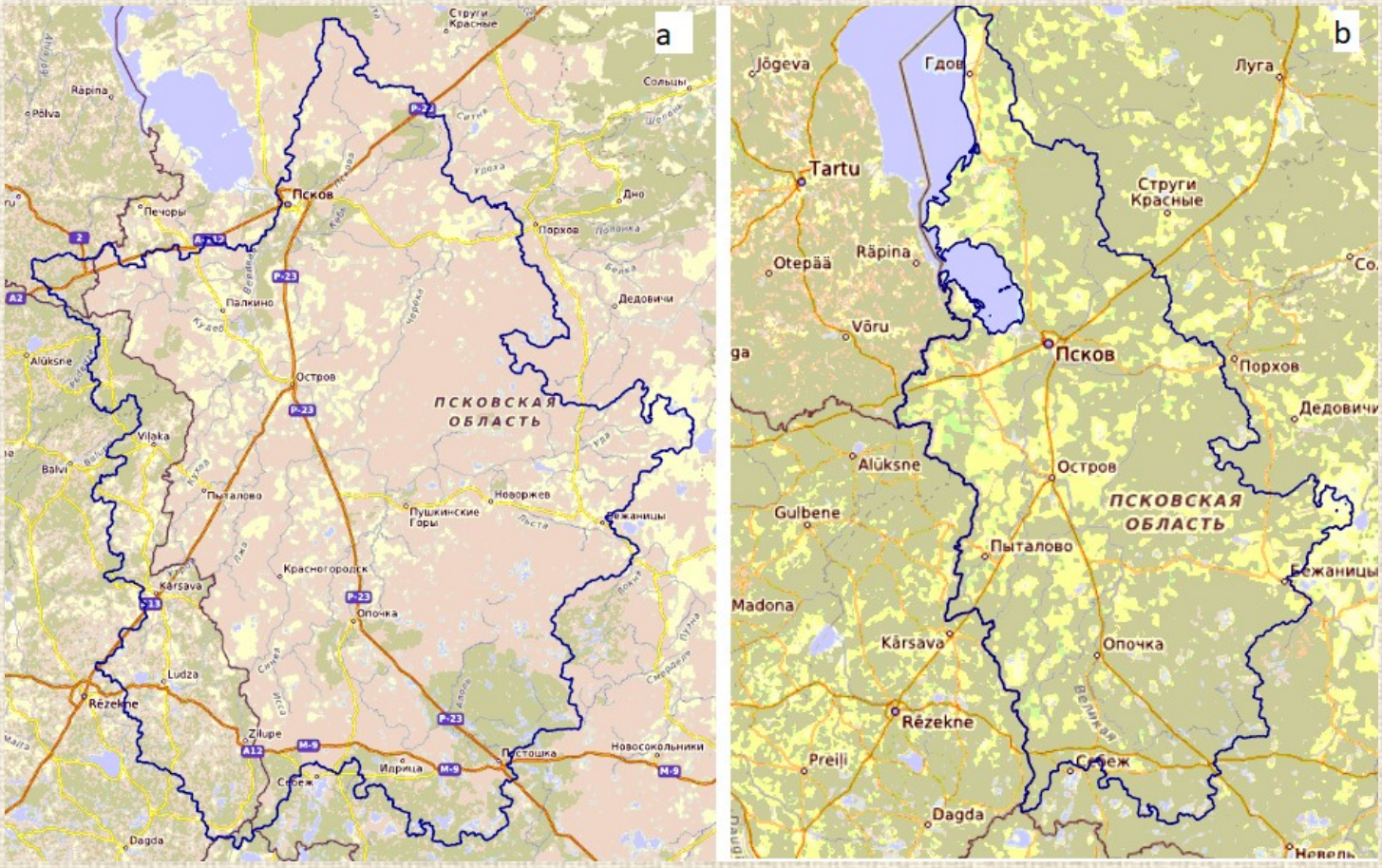
Стохастический генератор метеоэлементов

- Стохастическая модель погоды

Модель формирования стока на водосборе *IL_HM* (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015) [Кондратьев, Шмакова, 2005; Кондратьев, 2007] предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади.

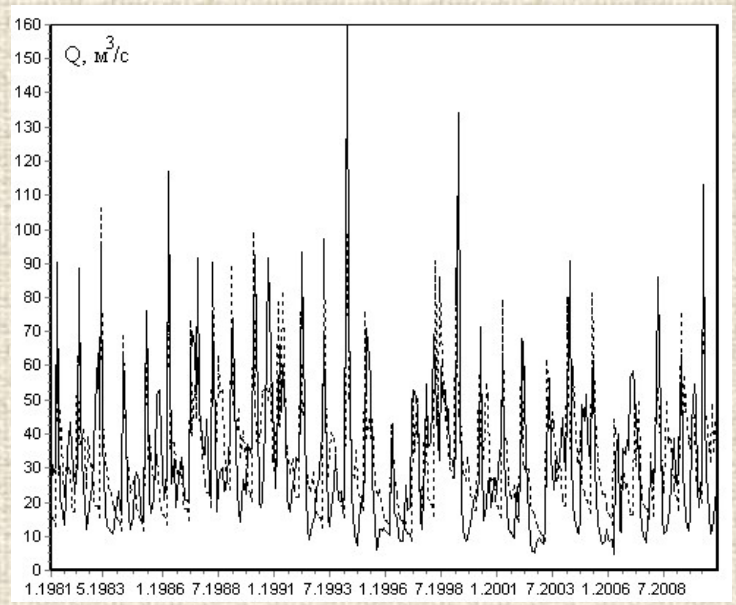


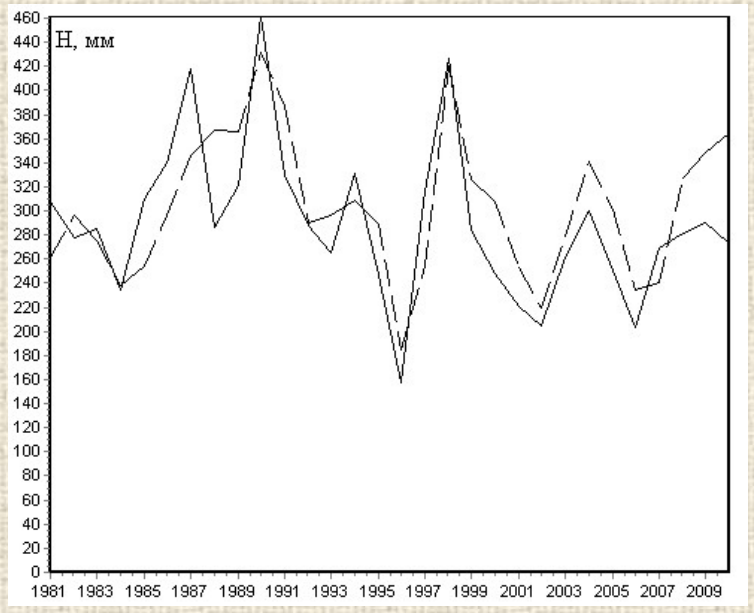
Схемы водосбора р. Великой (*a*) и российской части водосбора Чудско-Псковского озера (*b*)



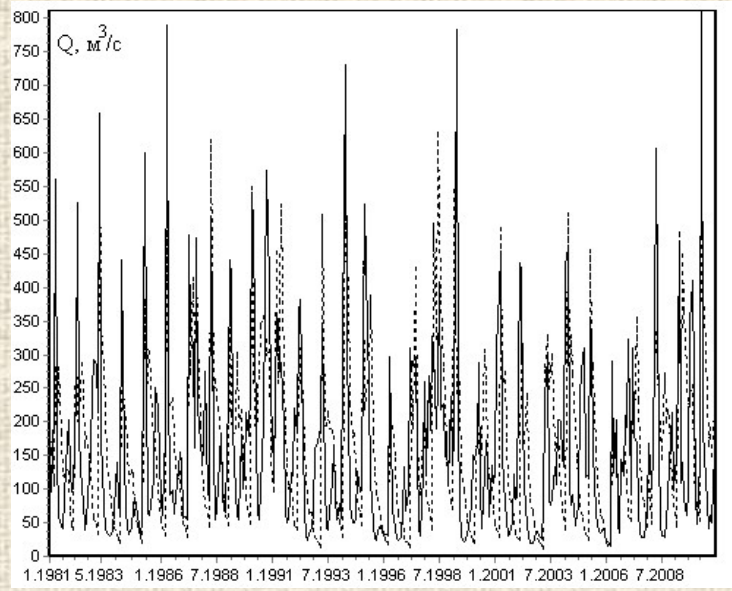
Результаты моделирования стока Великой с месячным и годовым шагами по времени

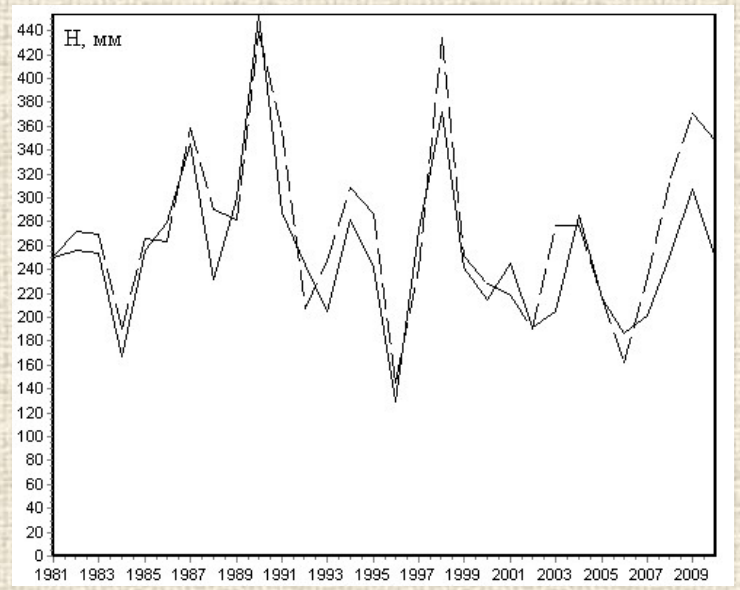
Створ Опочка



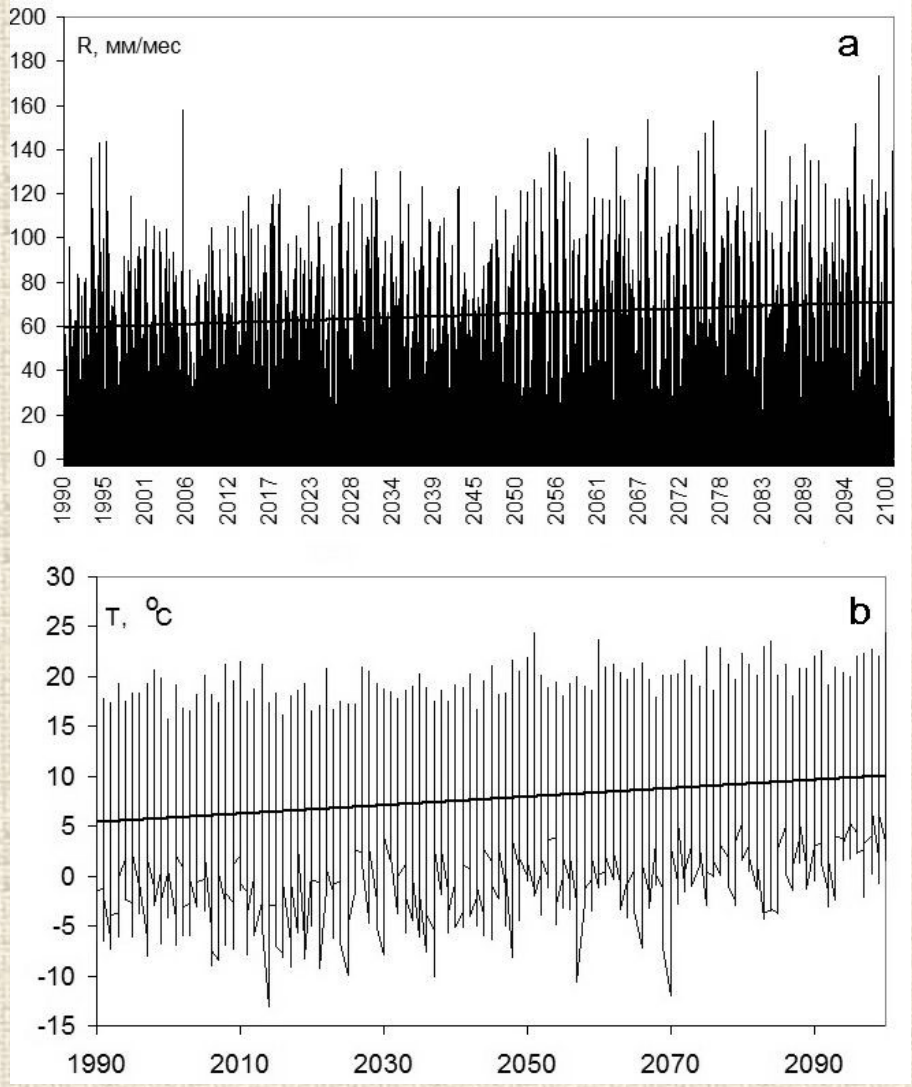


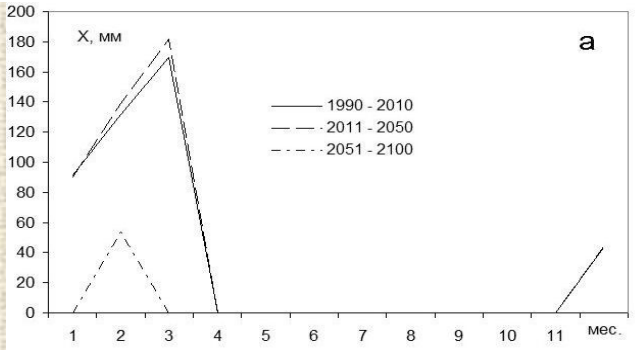
Створ Пятоново

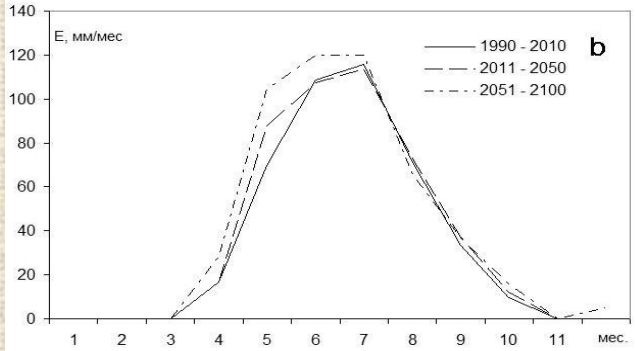




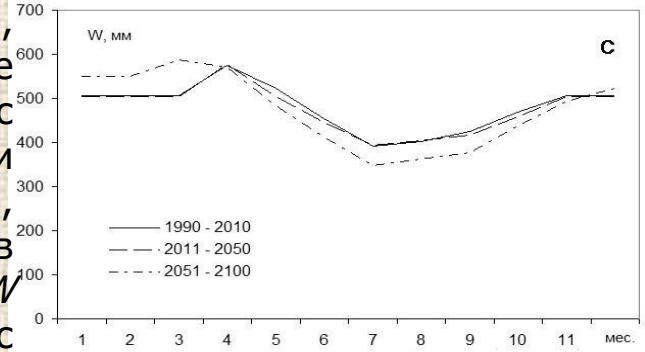
Динамика изменений осадков и температуры воздуха за период с 1990 по 2100 годы в соответствии с выбранным сценарием (ECHAM4/OPYC_SRES A2) для водосбора Чудско-Псковского озера.

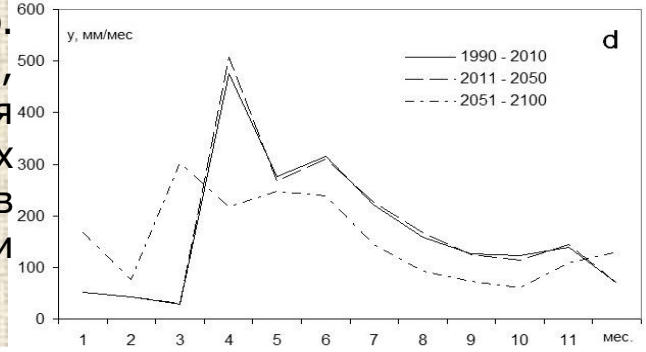






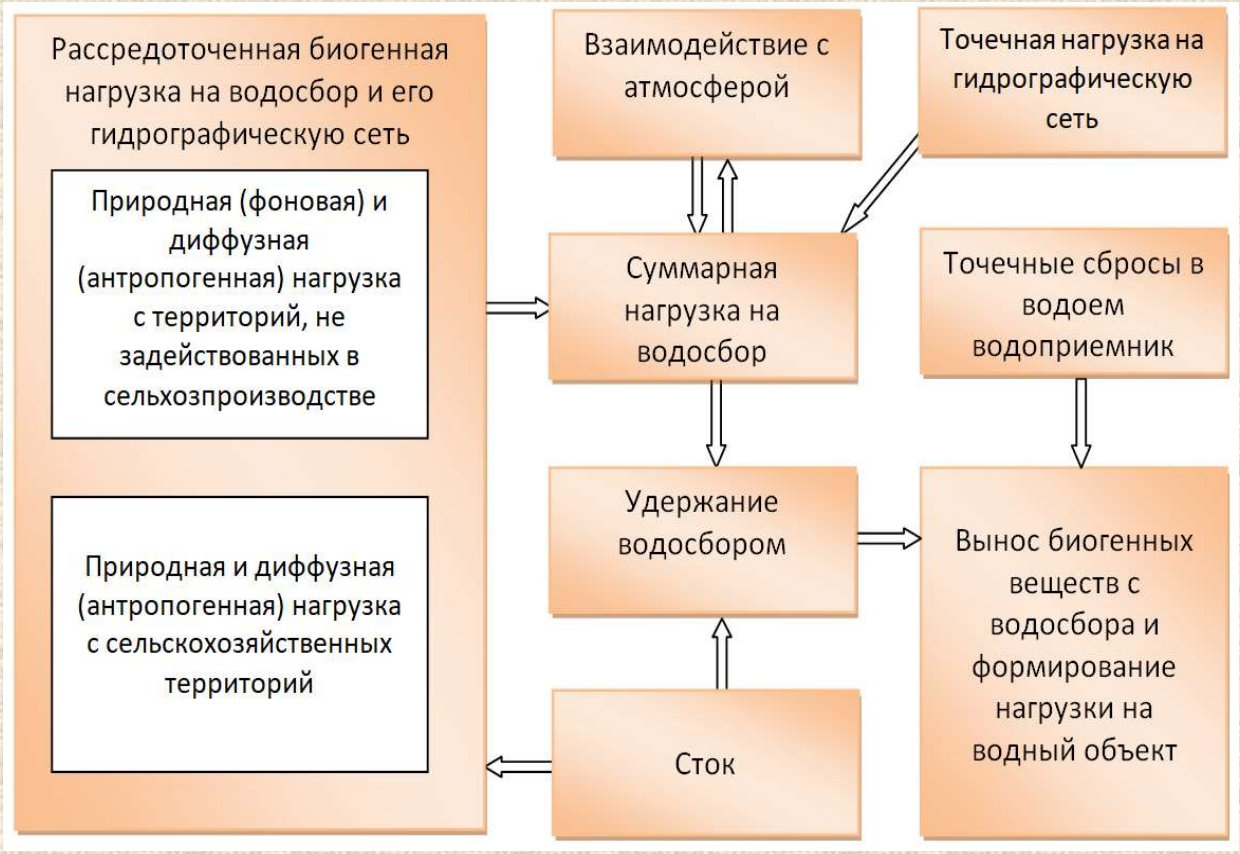
Снегозапас X (*a*), суммарное испарение *E* с поверхности водосбора (*b*), влажность почв зоны аэрации *W* (*c*), слой стока *Y* с водосбора р. Великая озера (*d*), рассчитанные для рассматриваемых интервалов времени

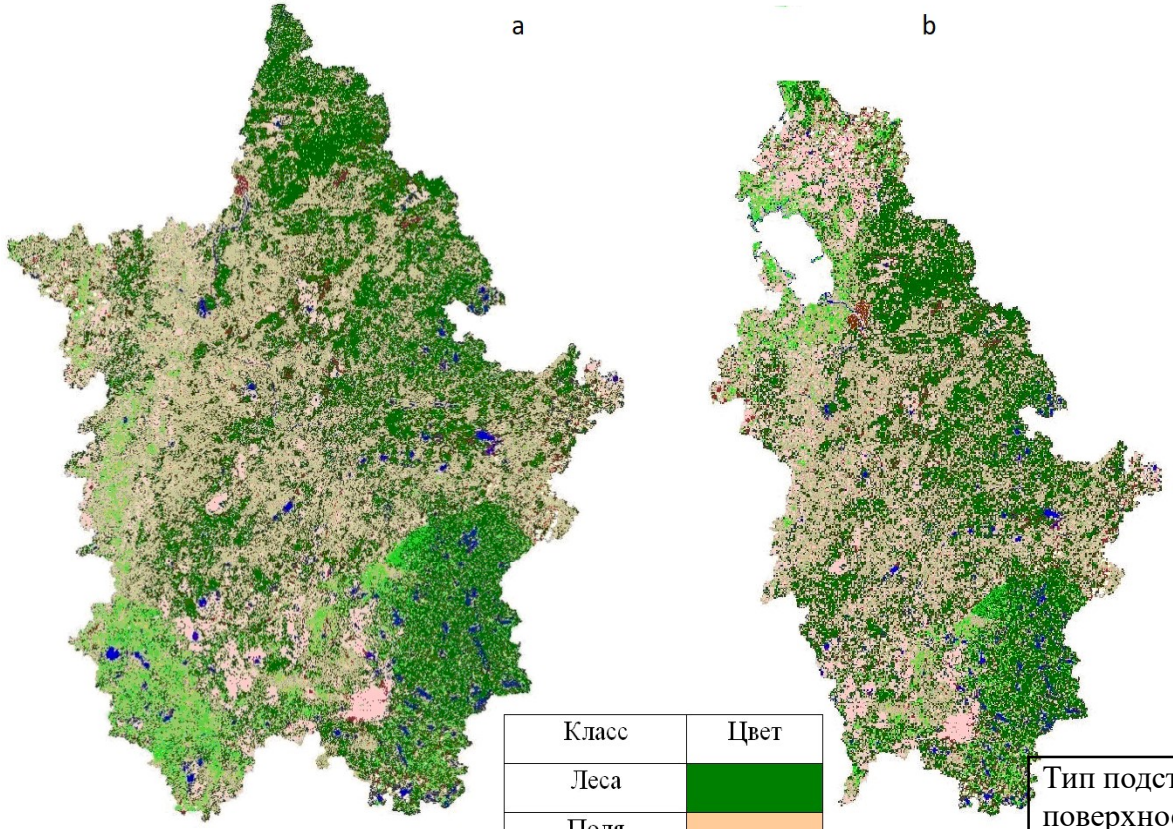




Модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект *IL_LM*

(Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014) [Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2011] предназначена для оценки биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогноза ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью

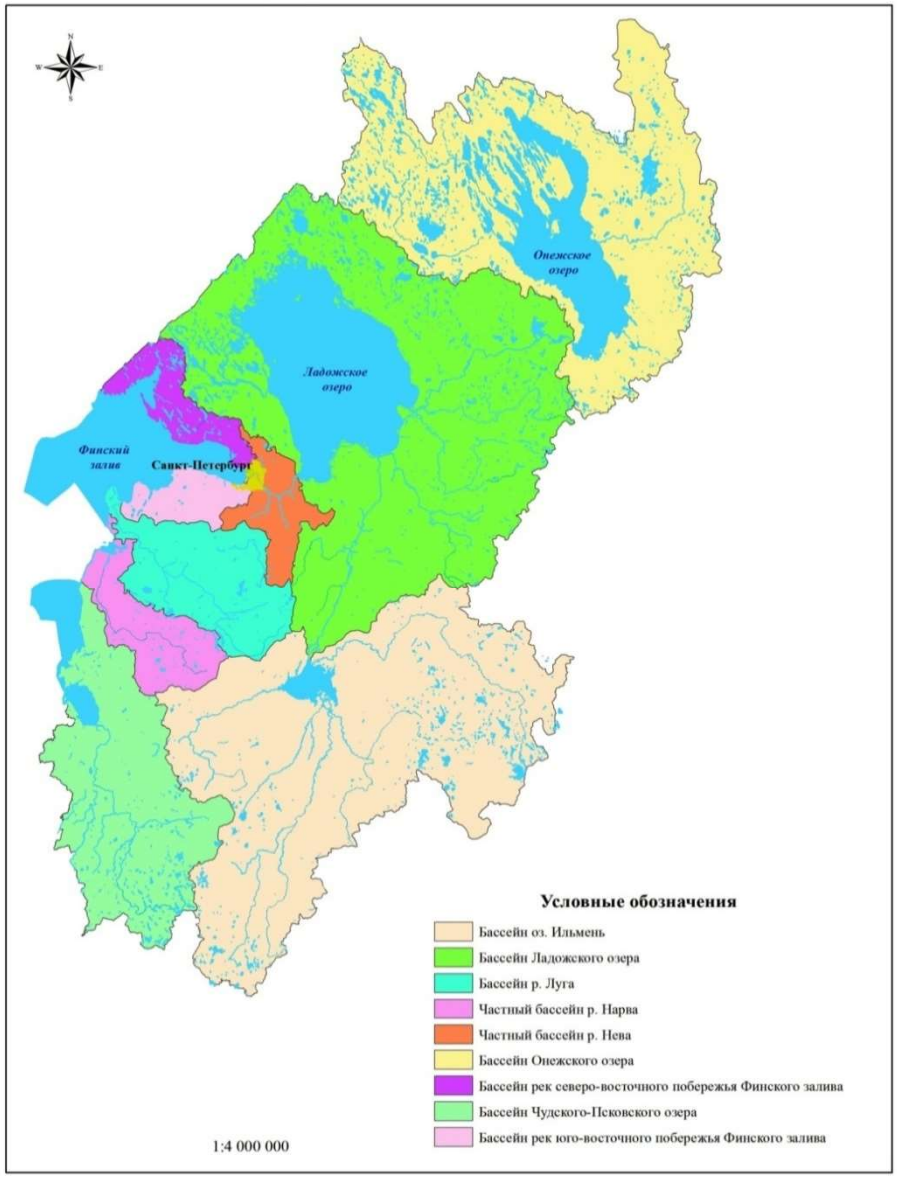




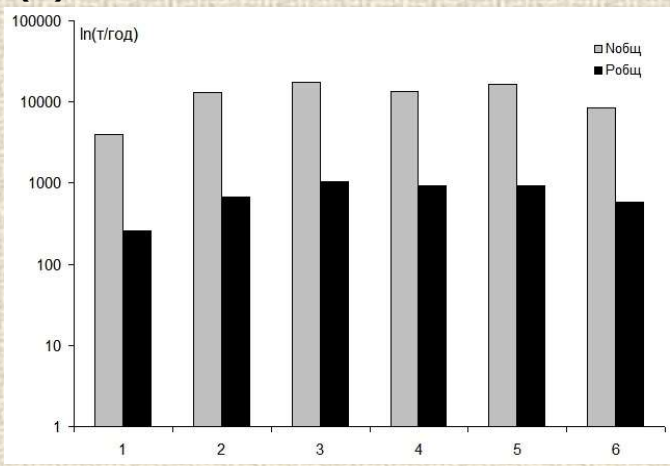
Класс	Цвет
Леса	
Поля	
Луга	
Болота	
Урбан. земли	
Вода	
Облака	

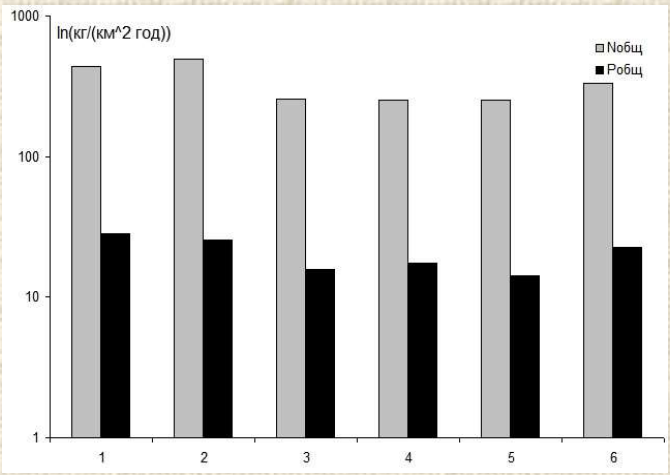
Результаты идентификации различных типов подстилающей поверхности (км^2) на основе космических снимков для водосбора реки Великая, створ - Псков (a) и Российской части водосбора Чудско-Псковского озера (b)

Тип подстилающей поверхности	Водосбор р.Великая, створ - Псков	Российская часть водосбора Чудско-Псковского озера
Леса	10440	10565
Поля	6885	6635
Луга	924	987
Болота	6495	6792
Урбанизированные и заброшенные земли	708	733
Водная поверхность	410	443
Неопознанные объекты	137	195
Всего	25999	26350



Соотношение значений выноса азота и фосфора (т/год) с рассмотренных водосборов: неконтролируемые территории (1), контролируемые притоки (2), частный водосбор Ладожского озера (3), водосборы Онежского озера (4), озера Ильмень (5), Чудско-Псковского озера (6)



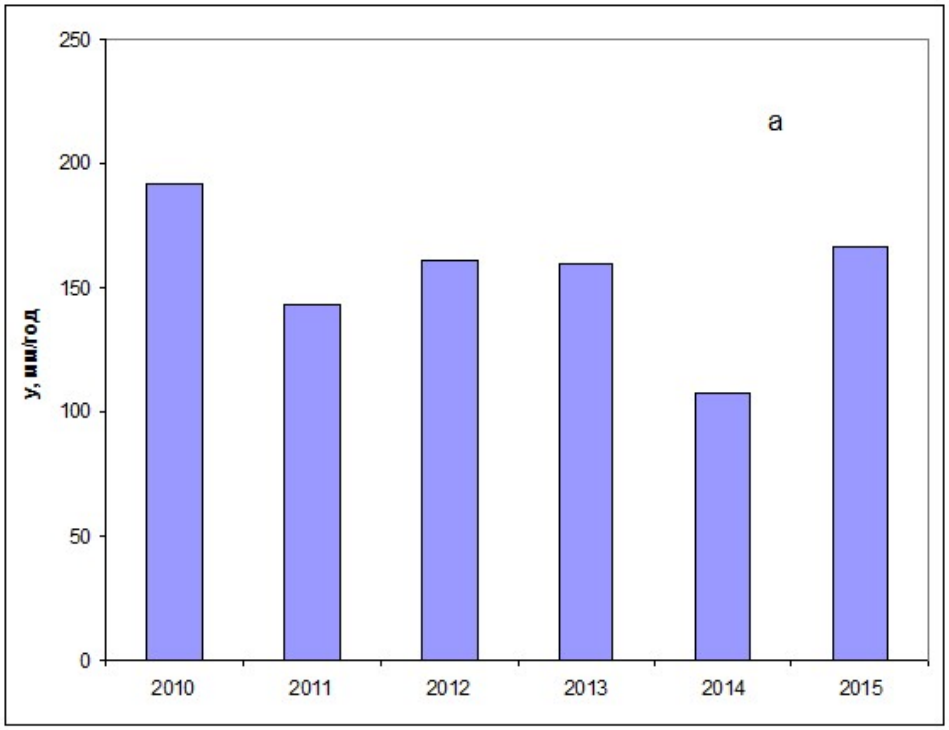


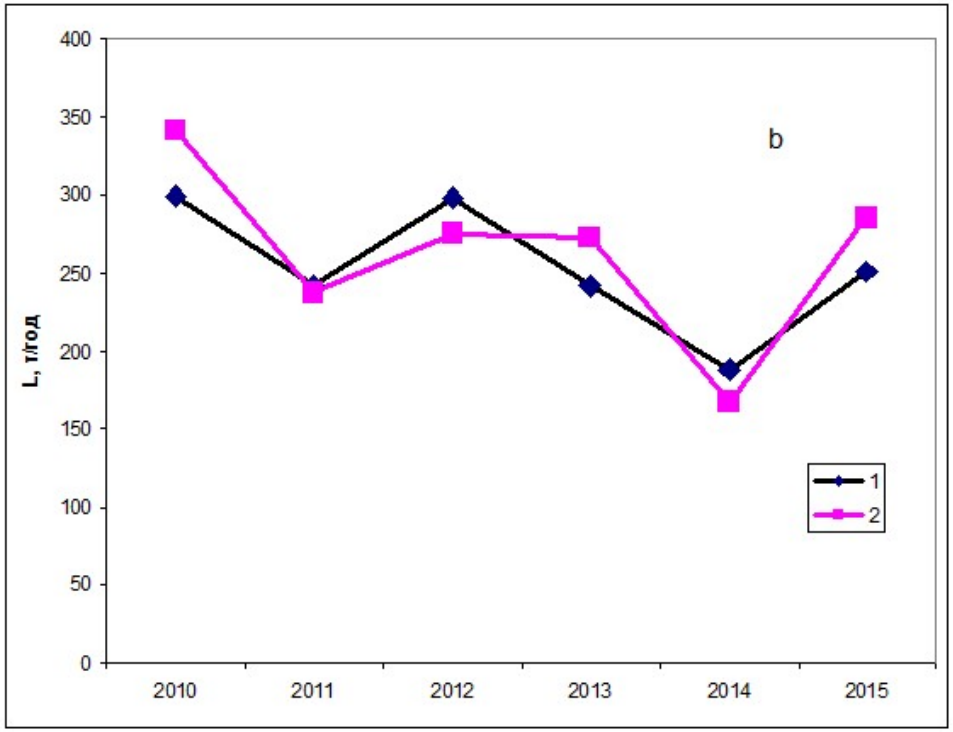
Соотношение значений модуля выноса азота и фосфора (кг/км2 год) с рассмотренных водосборов

Основные показатели формирования сельскохозяйственной нагрузки

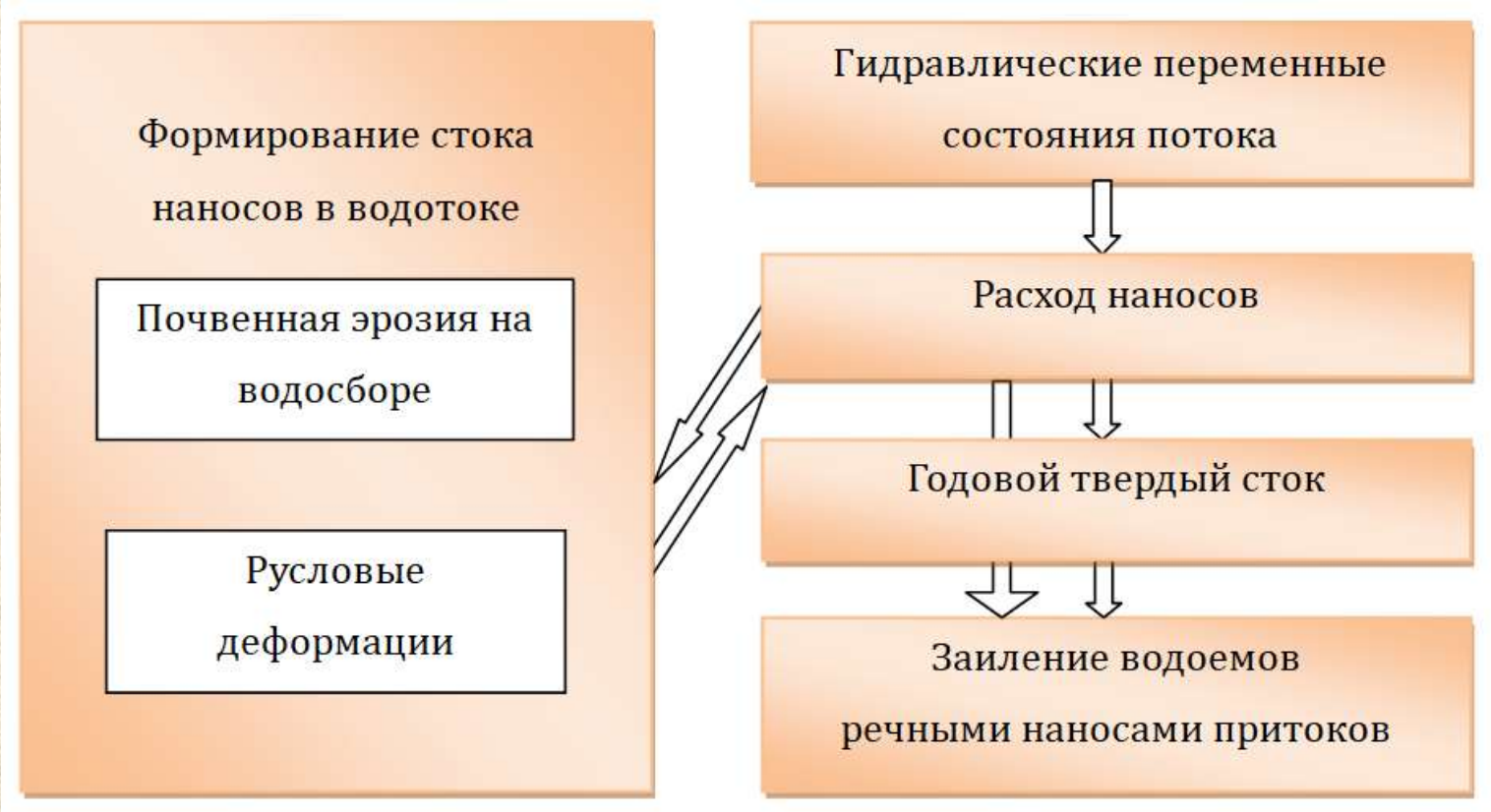
Показатели	Российская часть водосбора Чудско-Псковского озера	Водосбор реки Великая
Поголовье крупного рогатого скота	103900	69785
Поголовье свиней	403676	386346
Поголовье овец и коз	27062	24458
Поголовье птицы	213758	178150
Поголовье лошадей	2252	2172
Площади угодий, на которые вносятся минеральные и органические удобрения (га)	142518	132705
Доза внесения $P_{общ}$ с минеральными удобрениями (кг/га)	6.7-21.1	6.7
Доза внесения $P_{общ}$ с органическими удобрениями (кг/га)	3.2-108.4	3.2-108.4
Современное значение сформированной нагрузки (тР/год)	246.28	238.29
Фосфорная нагрузка при условии использования НДТ(тР/год)	235.60	228.34

Динамика слоя стока *y*, мм/год (a) и вынос фосфора *L*, т/год (b) по данным наблюдений (1) и моделирования (2) с водосбора реки Великой за период 2010-2015 гг.

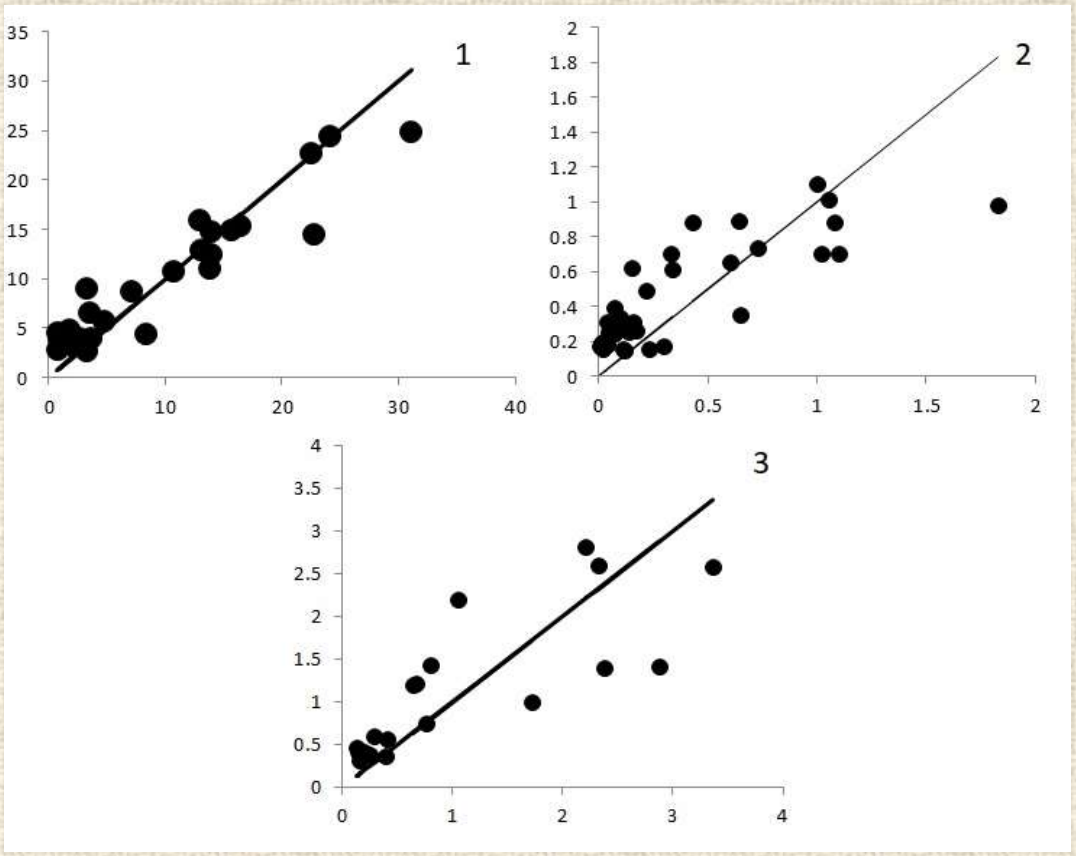




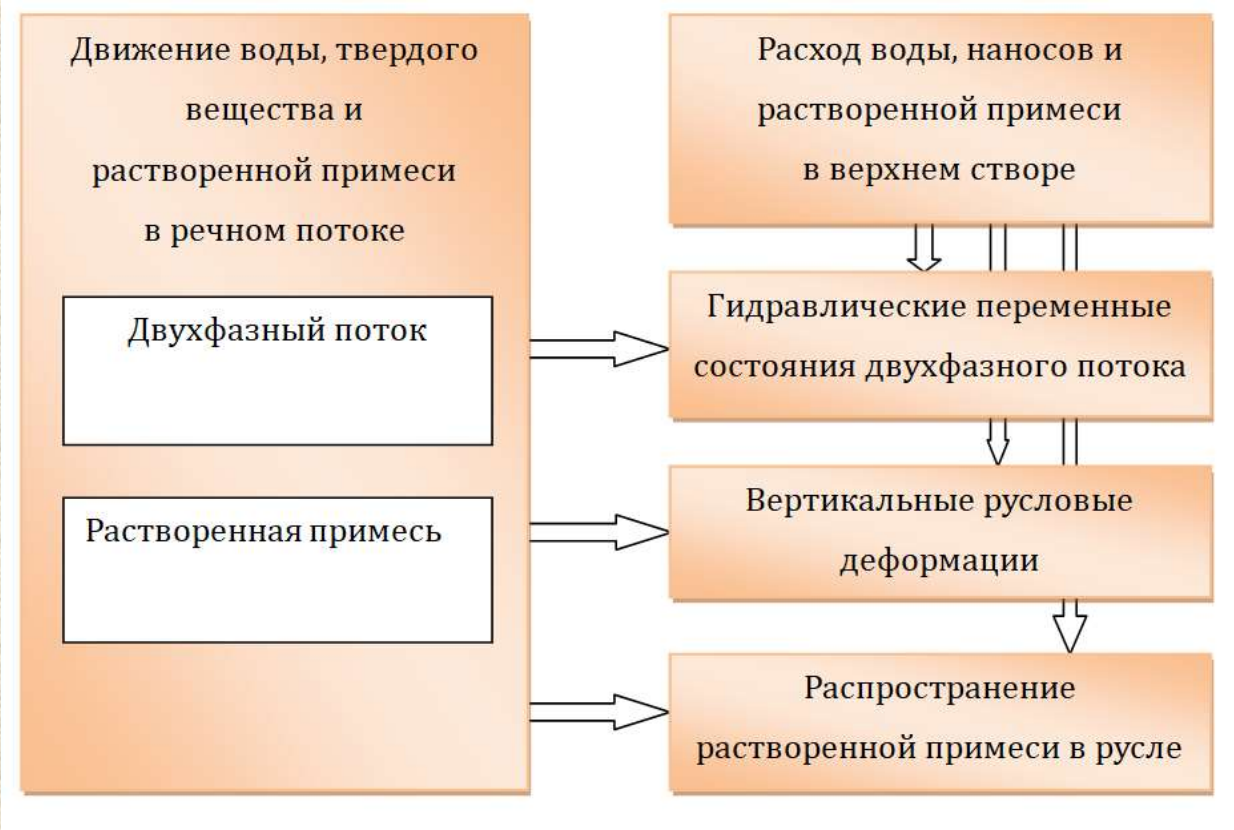
Модель твердого стока рек *IL_ASR* (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014) [Шмакова, 2013] предназначена для расчета параметров распределения мутности воды и расхода наносов. Основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле общего расхода наносов.



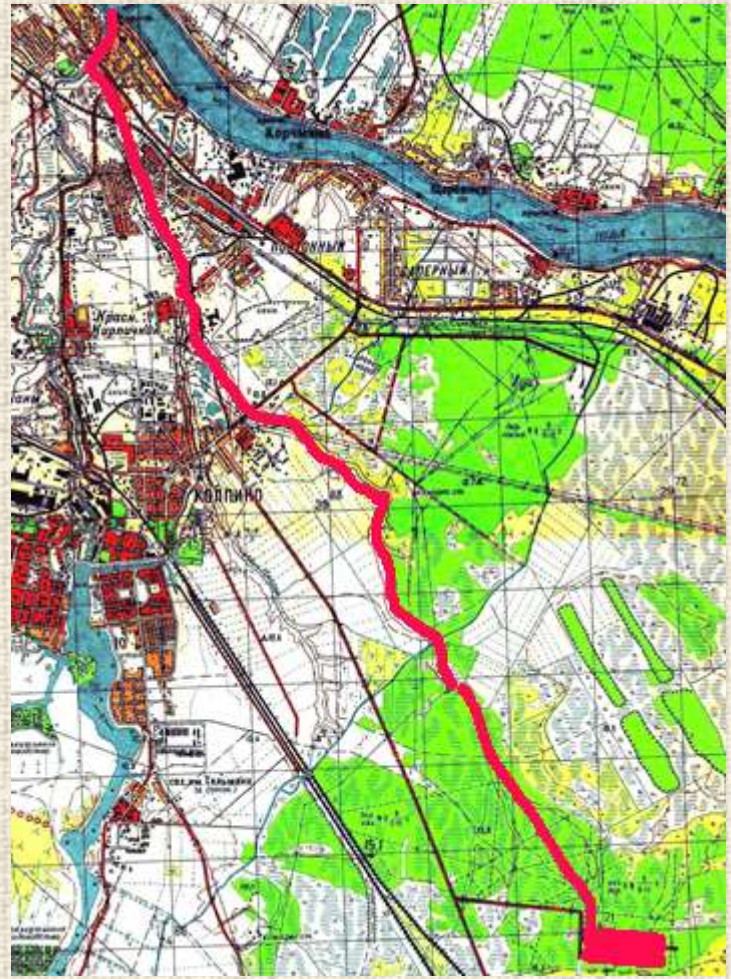
Измеренные и рассчитанные расходы наносов (кг/с) для среднего периода водности: 1 — р. Оять — д. Шангиничи; 2 — р. Паша — с. Часовенское; 3 — р. Мста — Березовский Рядок

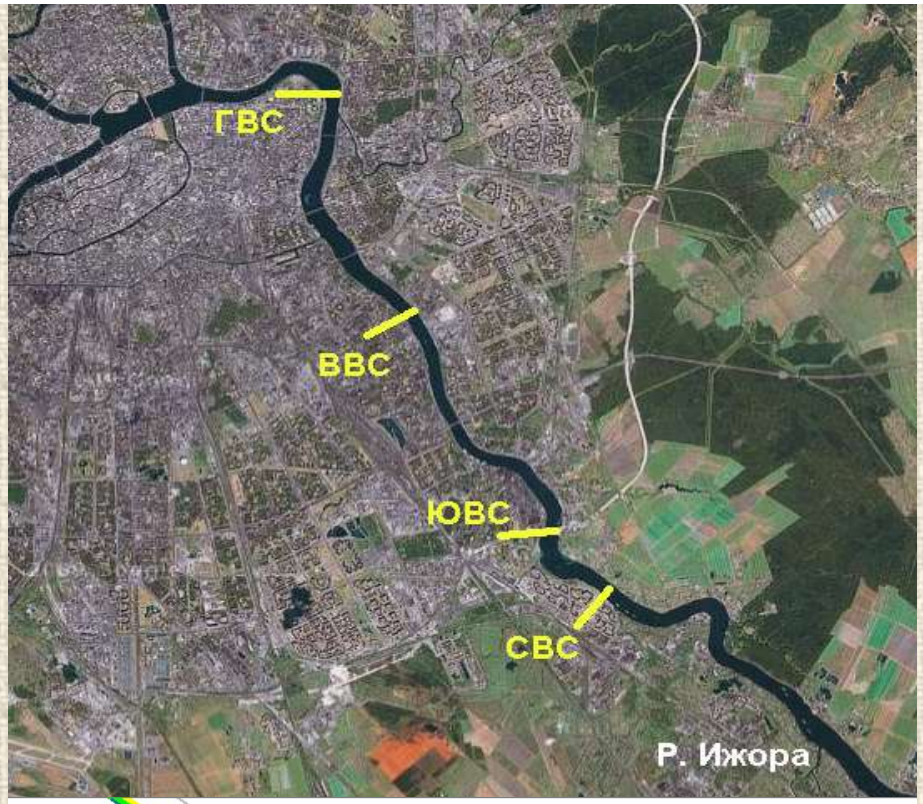


Модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле *IL_MTRiver* (Свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016) [Румянцев и др., 2010; Шмакова, 2013] предназначена для расчетов гидравлических переменных состояния двухфазного неустановившегося потока, перераспределения наносов и распространения растворенных примесей в русле.



Расчетная область течения р. Невы от места от впадения р. Ижоры до дельты (СВС - Северная водопроводная станция, ЮВС - Южная водопроводная станция, ВВС - Волковская водопроводная станция, ГВС - Главная водопроводная станция)

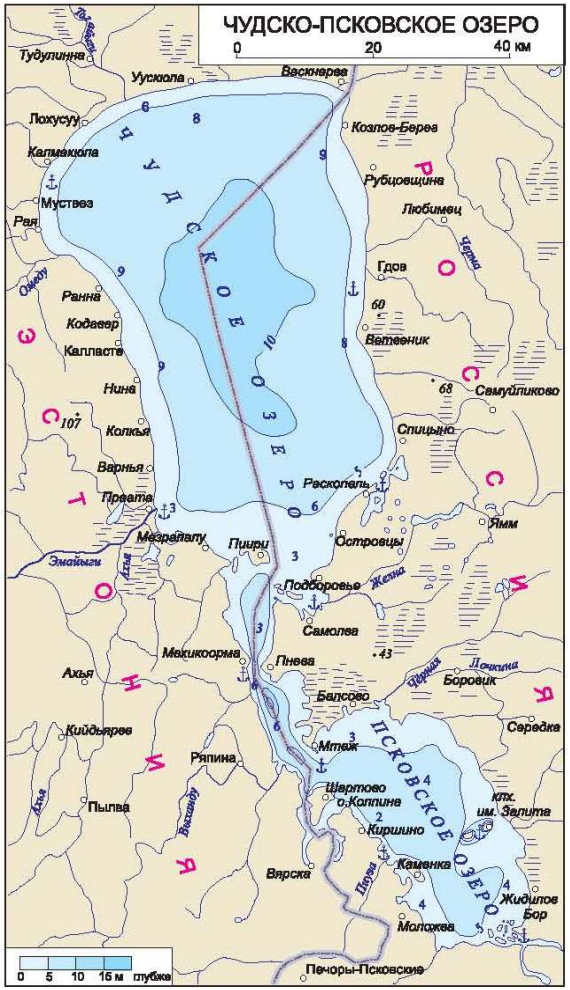




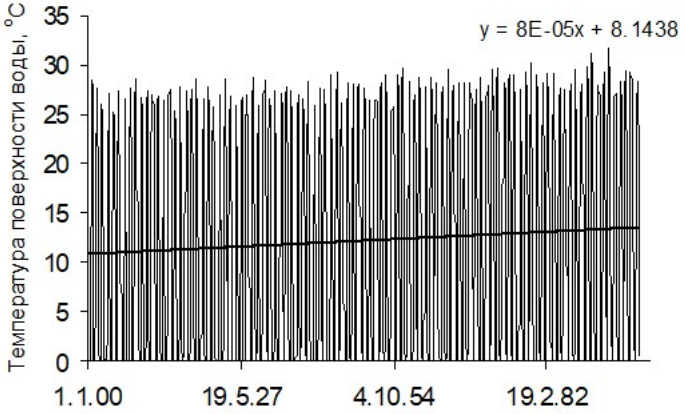
Одномерная модель теплового режима и перемешивания водоёма *Flake* [Golosov et al., 2007; 2012] позволяет выполнять расчеты термического режима в системе «снег – лед – вода – донные отложения» и условий перемешивания в период открытой воды. Служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в естественных и искусственных водоемах.

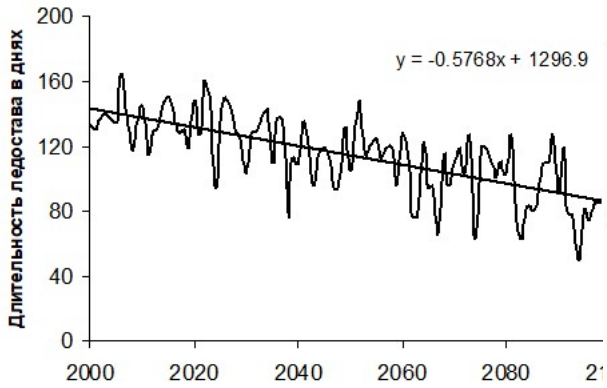
Одномерная модель динамики неконсервативной примеси в водоеме *FLakeEco* [Golosov et al., 2007; 2012] способна описывать годовой цикл кислородного режима, сезонную динамику концентрации биогенных элементов, первичную продукцию фитопланктона, а также сезонную динамику общей биомассы фитопланктона.

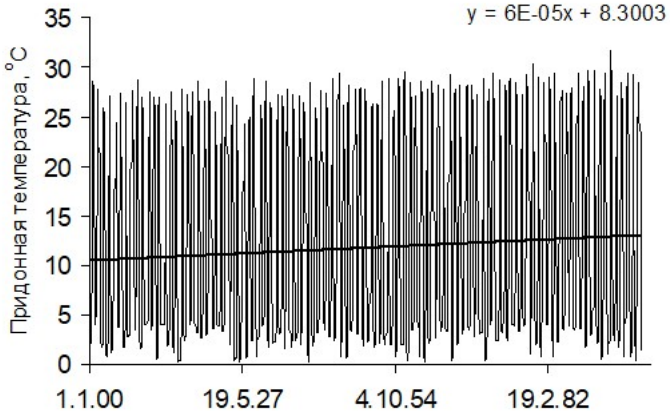
Результаты прогностической оценки изменения температурного и ледового режима Чудского озера для сценария (ECHAM4/OPYC_SRES A2)

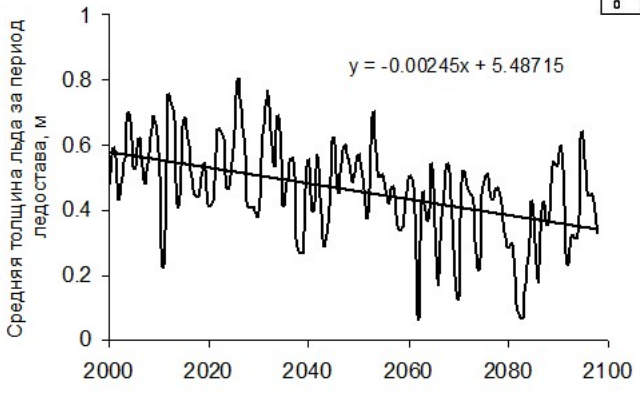


Чудское озеро

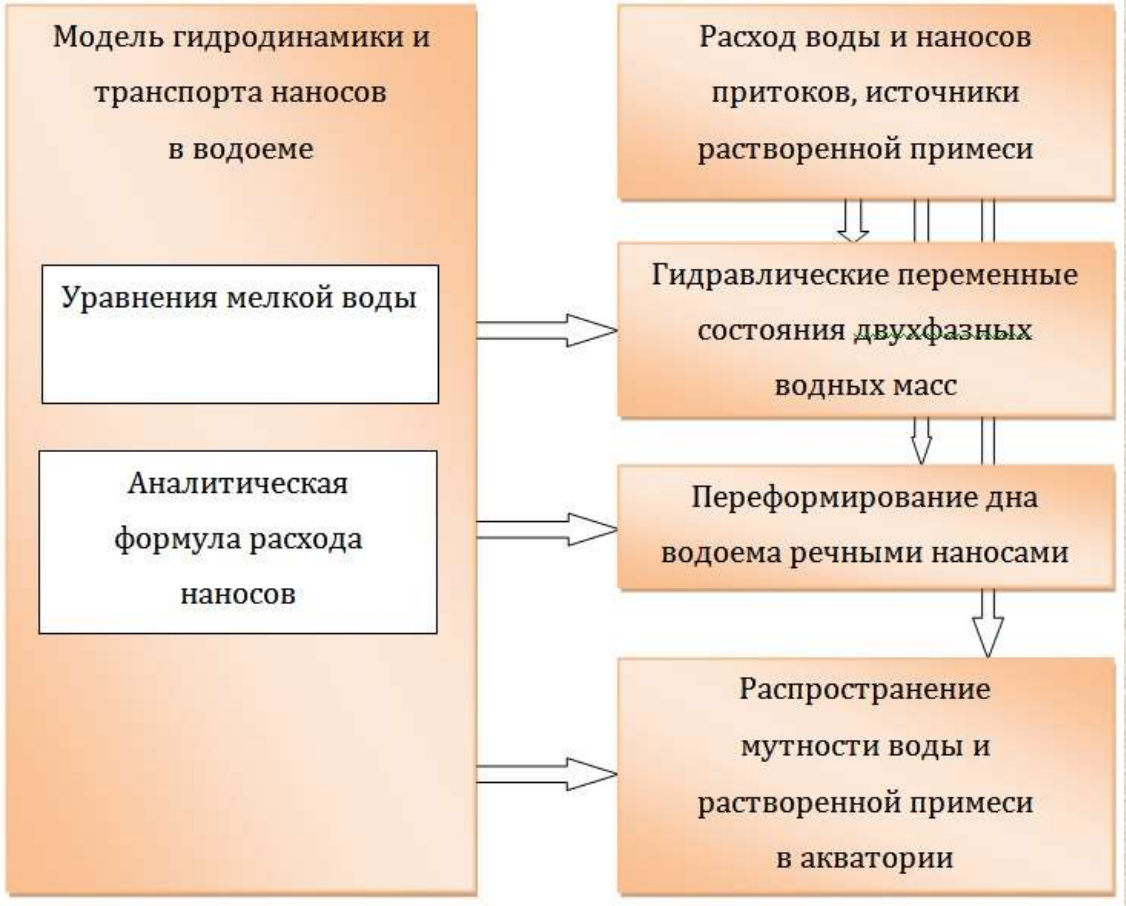


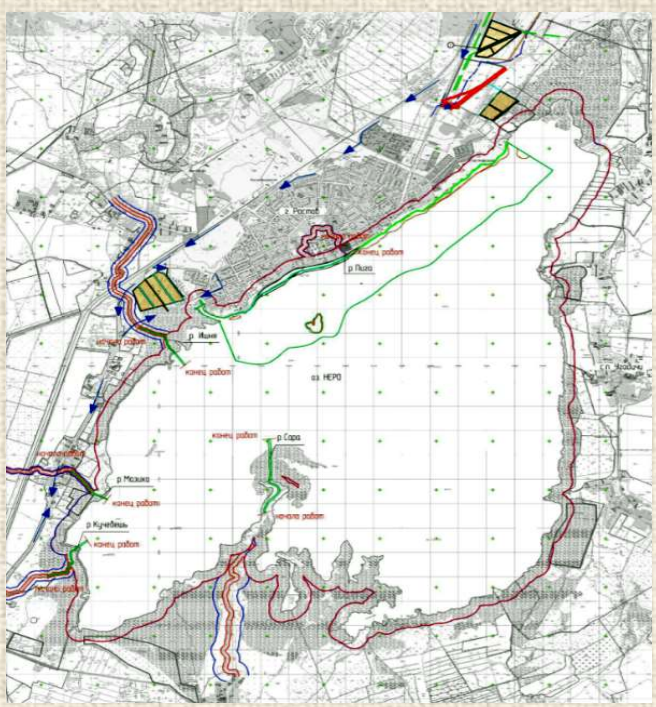




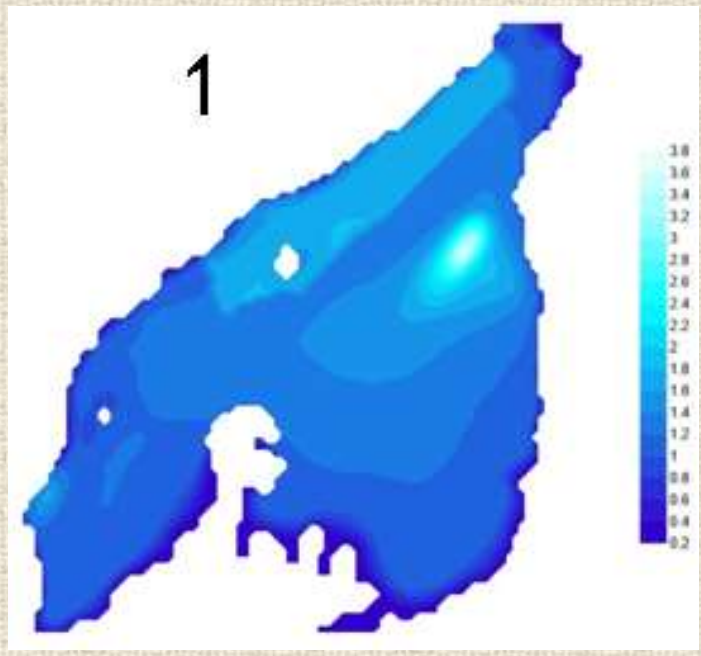


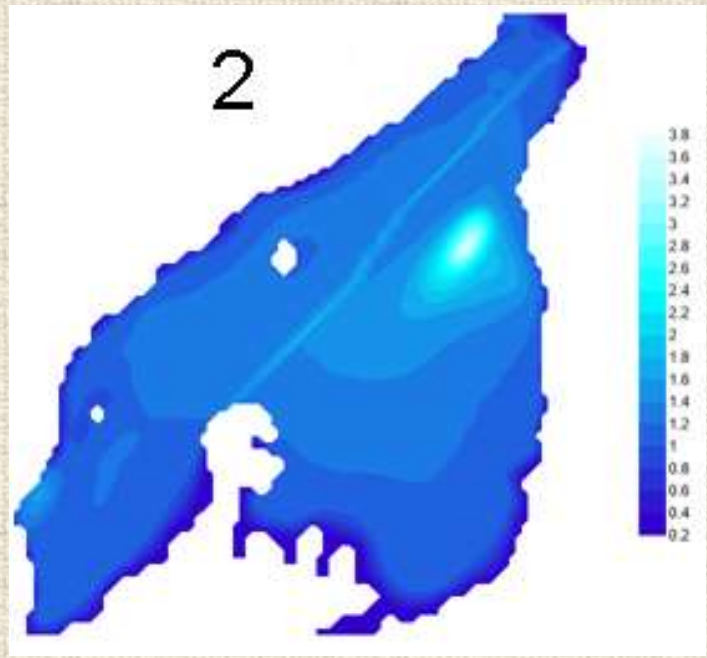
Двумерная модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме *IL_MTLake* (Свидетельство о государственной регистрации № 2018615451 от 08.05.2018) [Шмакова, 2013; Кондратьев, Шмакова, 2018] основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов. Позволяет рассчитывать пространственную структуру течений, траектории распространения примеси и изменения морфометрических характеристик ложа водоема.





Результаты моделирования заиления мелководного оз. Неро — крупнейшего озера Ярославского Поволжья. Средняя глубина озера — 1,5 м, площадь зеркала около 54,5 км^2.

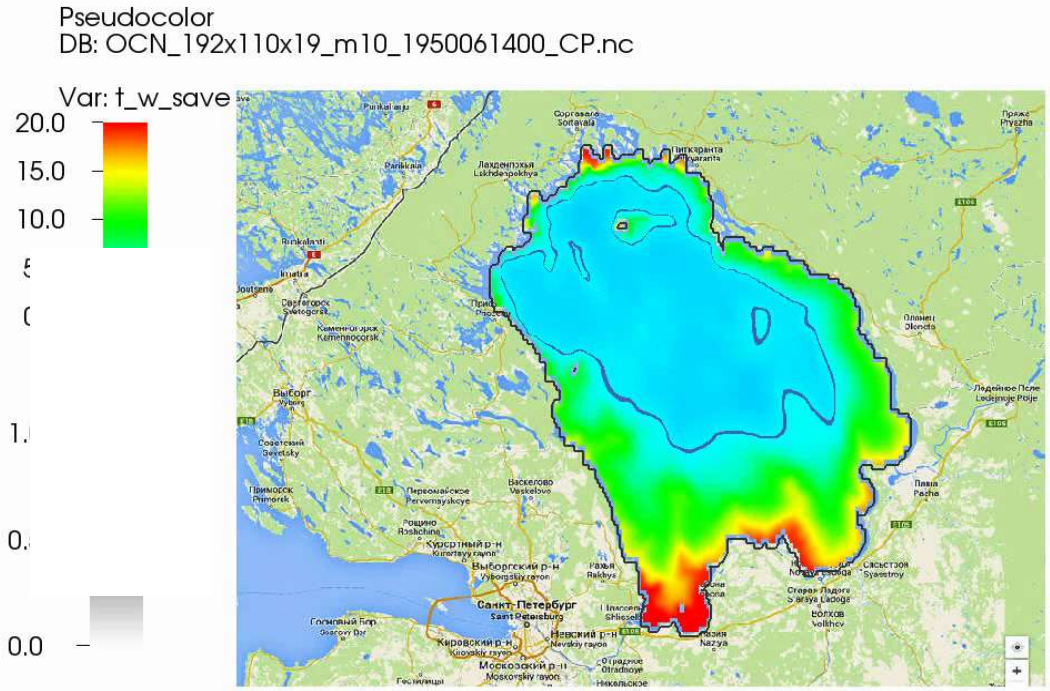




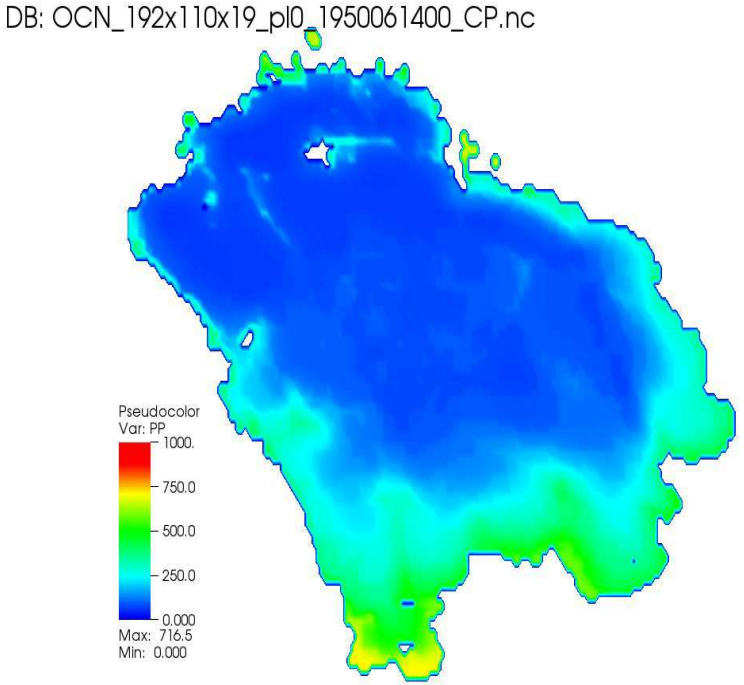
Трехмерная модель тепло и массопереноса в водоеме включает уравнение состояния слабоминерализованной воды, программные модули для расчета теплообмена через границу раздела вода – дно и расчета процессов первичного продуцирования. Модель позволяет исследовать термический и ледовый режимы крупных озерных систем в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий и при возможных климатических изменениях. Модель является средством выполнения оценок распространения вод притоков в акваториях

Ладога. Поле температуры, положение термобара (а) и первичная продукция фитопланктона (б) в середине июня при среднеклиматическом атмосферном воздействии

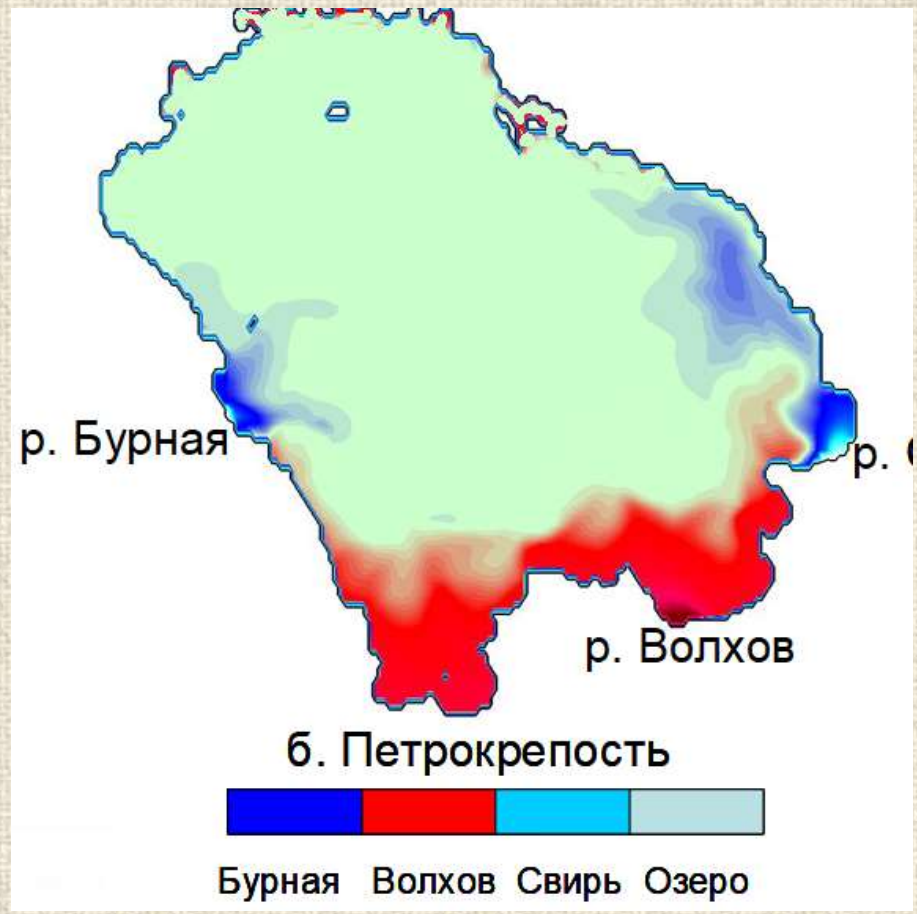
(а)



(б)



Ладога. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера, характерное для зимнего периода.



Стохастическая модель погоды (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015**)** разработана под руководством Виноградова [1988] и практически реализована Шмаковой [2000]. Модель состоит из блока оценки параметров модели и блока генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов.

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока *H*, рассредоточенной (*LPпр* и *LNпр*) и природной (*LPnat* и *LNnat*) составляющих биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора

	$X_{ср}$	σ	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
H, мм/год	242,41	57,02	375	336	281	204	148	110
$LP_{пр}$, т/год	400	81,52	590	535	455	345	265	210
LP_{nat}, т/год	269	50,67	387	353	303	235	185	151
$LN_{пр}$, т/год	8549	2013	13239	11870	9898	7200	5228	3859
LN_{nat}, т/год	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

Перспективы развития ДС моделирования в рассматриваемой области состоят, прежде всего, в совершенствовании методов детерминированной оценки стока, выноса взвешенных частиц и растворенных примесей с водосбора и в русловом потоке, а также массопереноса на акватории водоема.

Прогресс в этом вопросе зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований с целью уточнения параметров моделей.

Перспективы практического использования ДС моделирования заключаются в возможности планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с водностью, а также с учетом изменений условий формирования стока, отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений.

Спасибо за внимание