

Лекция 2

Развитие методов математического моделирования формирования речного стока и современные приложения гидрологических моделей

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

Содержание

Эволюция методов математического моделирования формирования речного стока с начала XX века

1910-1920-е гг.: начало накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов

1930-1940-е годы: обобщение эмпирических фактов, начало построения гидрологической теории

1950-1960-е годы: внедрение в гидрологию речных бассейнов результатов теории динамических систем, создание первых численных (концептуальных) моделей формирования речного стока, разработка первых физико-математических моделей гидрологических процессов

1970-1980-е годы создание теории и практики физико-математического моделирования формирования речного стока; совершенствование концептуальных моделей

1990-2000-е годы: развитие методов моделирования пространственной неоднородности, скейлинга гидрологических процессов, методов исследования моделей

После 2010 года

Применение современных гидрологических моделей и технологий в задачах обеспечения водной безопасности (опыт ИВП РАН)

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

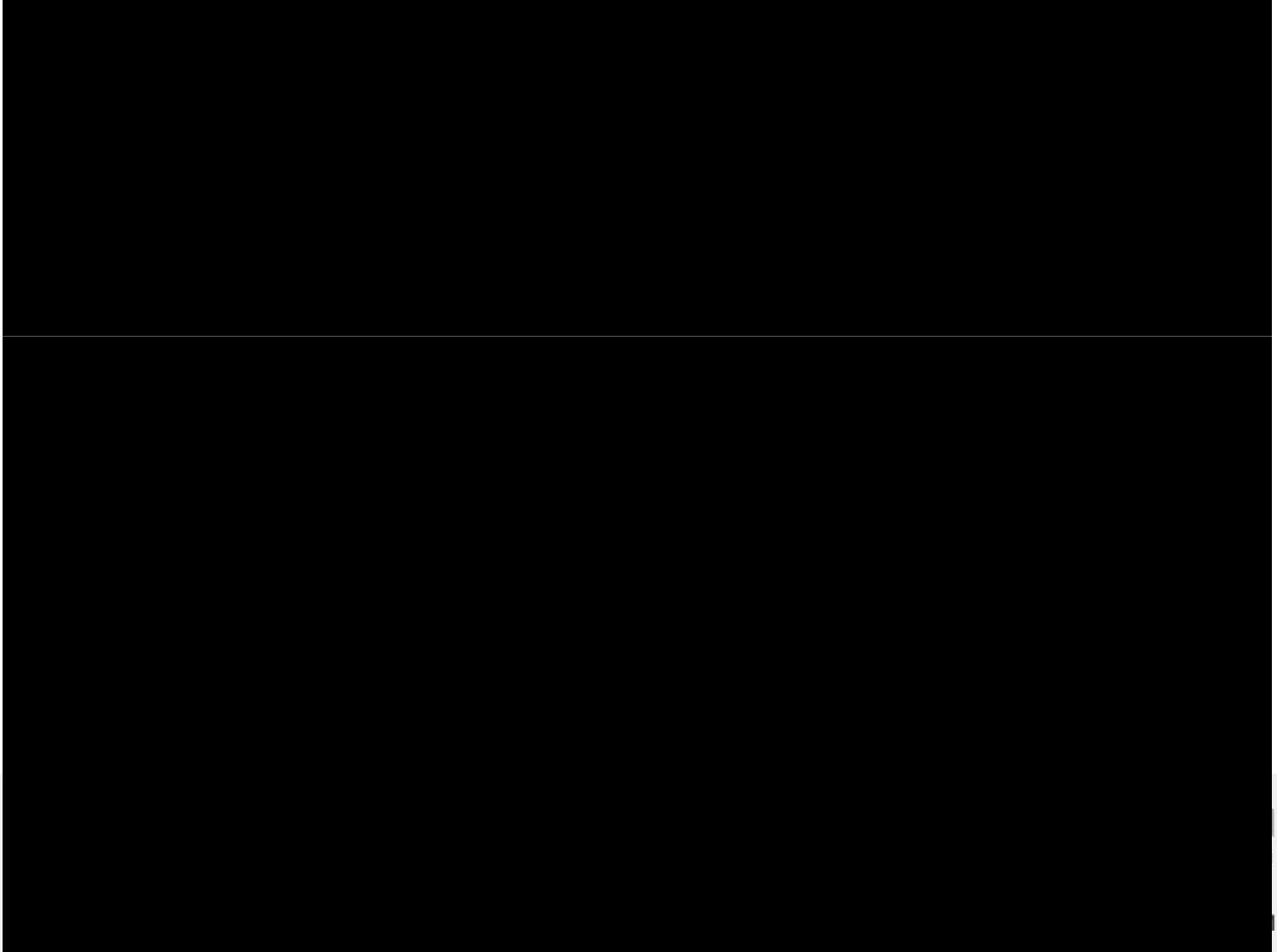
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года



Введение: о предмете лекции

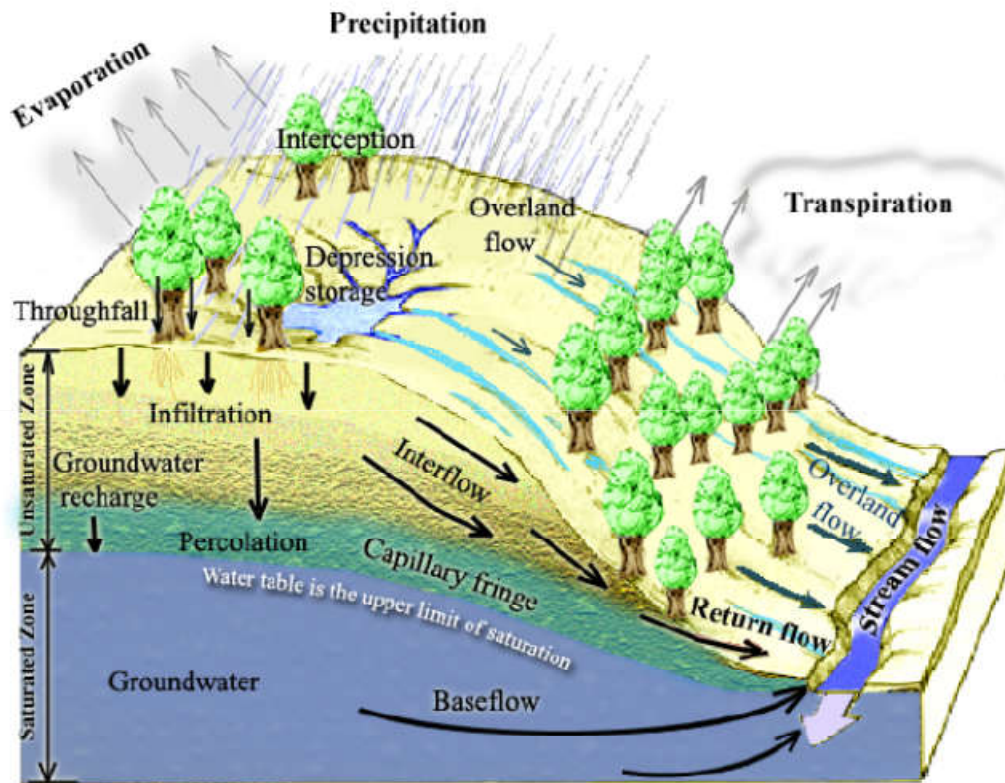
Hydrology is the science, that attempts to answer the question “What happens to the rain?” Penman (1961)



Введение: о предмете лекции

Что будет в лекции?

Эволюция
математических
(детерминистических)
моделей, описывающих
процессы
гидрологического цикла
в речном бассейне



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

Введение: о предмете лекции

Чего не будет в лекции?

О методах моделирования отдельных процессов гидрологического цикла речного бассейна

Это предмет специального исследования, которое выходит далеко за рамки обзора, а собственно достижения в этой области выходят и за рамки гидрологии суши, поскольку многие (если не большинство) из указанных методов разрабатывались и сейчас разрабатываются специалистами других наук: гидродинамиками, метеорологами, почвоведомы, геоморфологами, криолитологами, гляциологами. Но мы будем говорить о моделях отдельных процессов, если эти модели стали компонентами востребованных моделей формирования речного стока

О лабораторных и натурных экспериментах

Несмотря на то, что они сыграли, в ряде случаев, определяющую роль в развитии методов математического моделирования в гидрологии речных бассейнов

О совершенствовании методов решения прикладных задач: гидрологических расчетов и прогнозов

Только если результатами таких исследований стало создание новых методов математического моделирования в гидрологии



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

1910-1920-е гг.: начало накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов

В этот период в большинстве экономически развитых стран развиваются сети гидрологического мониторинга, прежде всего в целях борьбы с наводнениями, появляются первые эмпирические методы гидрологических прогнозов (например, метода соответственных уровней) и гидрологических расчетов (например, «рационального метода» расчета максимального речного стока)

В области развития методов математического моделирования этот этап ознаменован созданием первых физически обоснованных методов описания отдельных составляющих гидрологического цикла, многие из которых по прошествии десятилетий стали компонентами численных гидрологических моделей:

модель инфильтрации воды в почву, основанную на схеме капиллярных колонн (Green, Ampt, 1911)

модель перехвата жидких осадков растительностью, основанную на концепции существования предельной емкости задержания осадков растительностью (Horton, 1919)

исследованиях физико-механических свойств снежного покрова (Абельс, 1893)

первые работы гляциологов, в которых была предложена (Finsterwalder, Schunk, 1887) линейная зависимость интенсивности снеготаяния от температуры воздуха

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1910-1920-е гг.: начало накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов

Фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты в области физики почв, широко используемые в современных физико-математических моделях формирования речного стока, были получены российскими почвоведом, в том числе, **В. Р. Вильямсом, А. Г. Дояренко, Н. А. Качинским, А. Н. Костяковым, А. Ф. Лебедевым**, и американскими физиками – основателями современной физики почв: **Э. Бакингом, В. Гарднером, Л. Ричардсом**. Среди этих результатов стоит выделить обоснование и экспериментальное построение основной гидрофизической характеристики почв, зависимостей почвенно-гидрологических констант, гидравлической проводимости почв от их механических и структурных свойств (аналог получивших сейчас широкое **распространение педотрансферных функций**), и др.

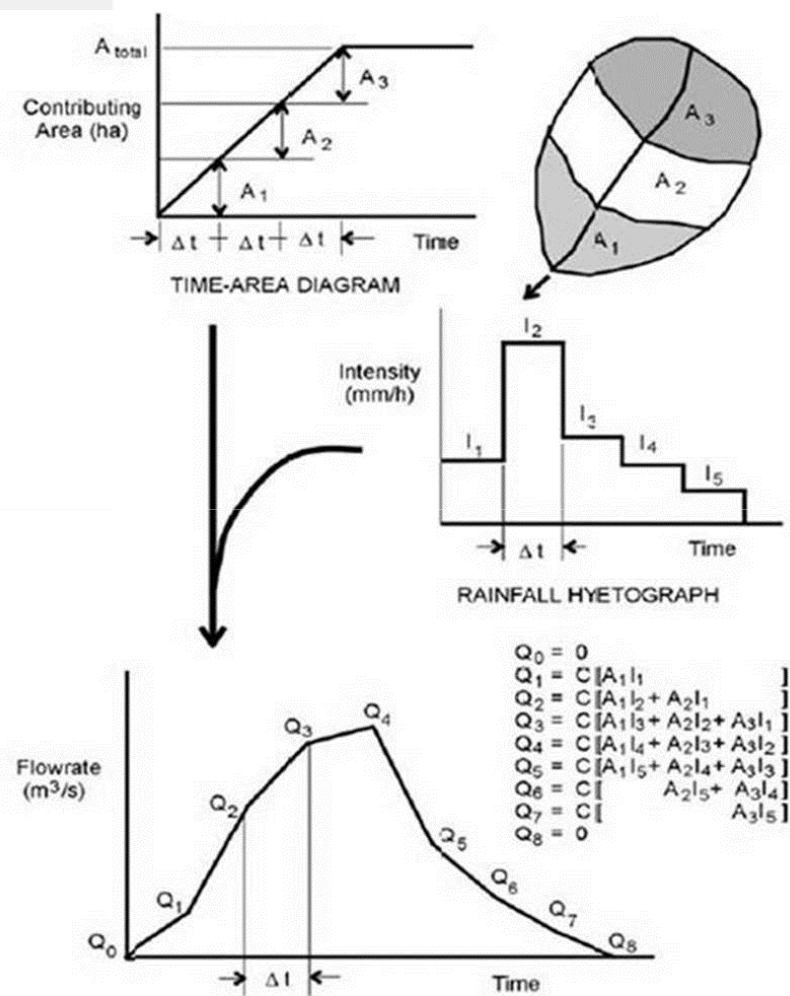
В конце рассматриваемого периода Л. Ричардсом (Richards, 1931) была создана **теория движения влаги в ненасыщенной зоне почвы** и обосновано получившее впоследствии его имя уравнение, описывающее это движение – одно из базовых уравнений в структуре многих современных физико-математических гидрологических моделей и моделей взаимодействия поверхности суши с атмосферой.

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

1910-1920-е гг.: начало накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов



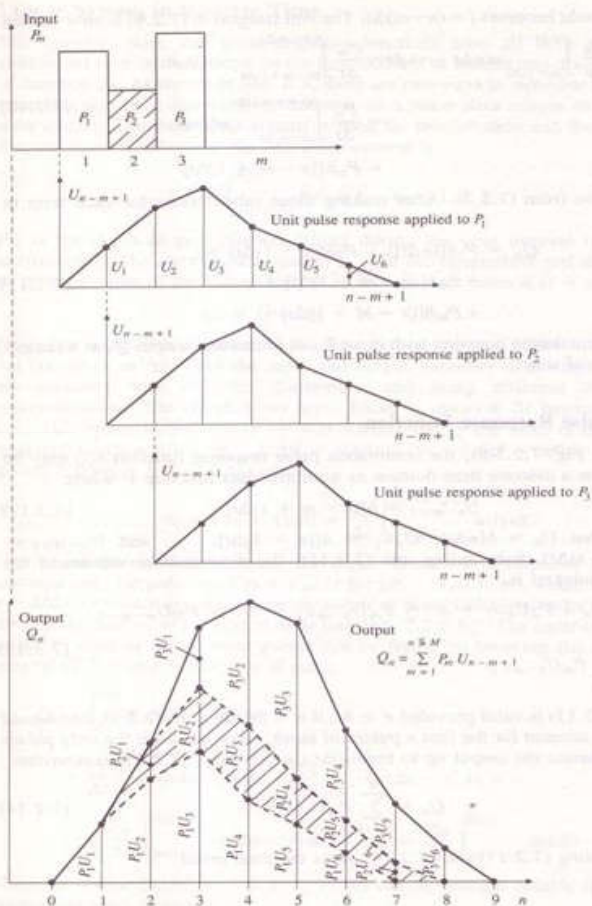
В начале 20 века французским инженером Э. Имбо впервые была предложена концепция метода изохрон для расчета гидрографа стока в замыкающем створе. На примере небольшого предгорного водосбора во Франции Э. Имбо показал, что при имеющейся оценке потерь дождевого стока трансформация стокообразующих осадков может быть произведена предложенным им методом ("time-area" метод в англоязычной литературе) с приемлемой точностью. Для расчета стока в период снеготаяния автор использовал оценку снеготаяния по коэффициенту стаивания с учетом влияния высотной зональности на температуру воздуха. Показано, что гидрограф паводка в замыкающем створе зависит от предшествующего дождю или таянию снега увлажнения бассейна, а также от интенсивности поступления воды на водосбор.

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1930-1940-е годы: обобщение эмпирических фактов, начало построения гидрологической теории

Концепция единичного гидрографа (Sherman, 1932; Horton, 1933)

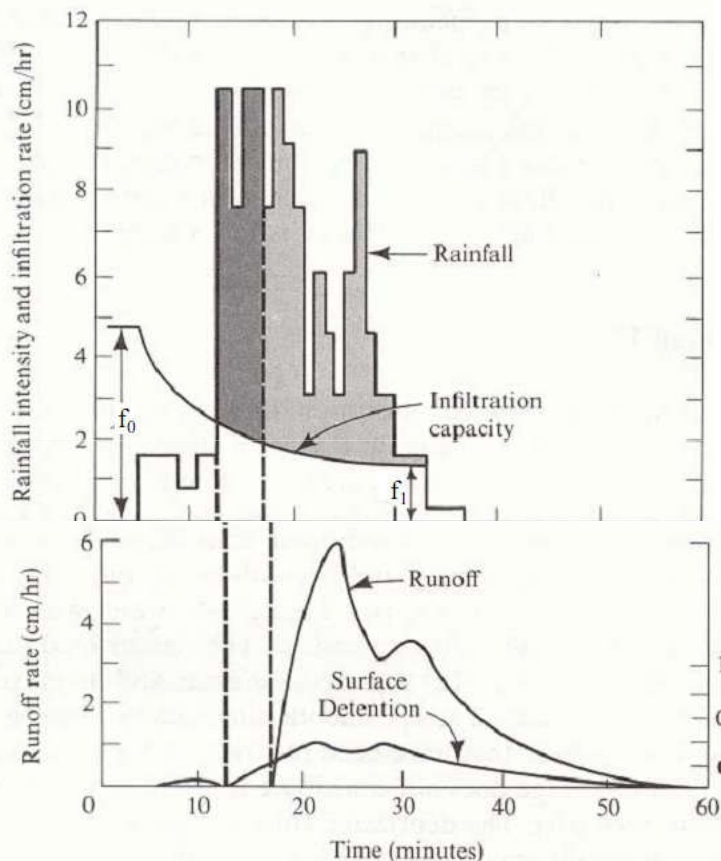
Через 25-30 лет метод единичного гидрографа получил физическое обоснование в рамках теории линейных динамических систем (Nash, 1957; Калинин, Милюков, 1958; Dooge 1959; Кучмент, 1968, 1969) и стал широко использоваться в моделях распространения паводковой волны, а также в структуре первых концептуальных моделей формирования речного стока (Стэнфордская, Сакраменто, SSAR, TANK)



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1930-1940-е годы

Теория поверхностного стока (Horton, 1933)



The shaded areas under the rainfall graph represent precipitation falling at a rate exceeding the infiltration rate. The dark grey area represents rainfall that enters depression storage, which is filled before runoff occurs. The light grey shading represents rainfall that becomes overland flow. The initial infiltration rate is f_0 , and f_1 is the final constant rate of infiltration approached in large storms



Robert Elmer Horton (1875–1945)

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1930-1940-е годы

Математическое описание неустановившегося движения воды в речных руслах

Н. А. Ржаницын, М. А. Великанов, С.А. Христианович

Математическое описание движения воды в насыщенных почвогрунтах

П. Я. Полубаринова-Кочина, Л. С. Лейбензон, Ч. Тейс

Физически обоснованный метод расчета испарения с водной поверхности и поверхности суши (Penman, 1948)

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1930-1940-е годы

Bernard (1937) впервые сформулировал модель поверхностного склонового стока на основе уравнения кинематической волны в сочетании с эмпирической моделью инфильтрации, разработал и реализовал (вручную) метод его численного решения на прямоугольной сетке, описывающей рельеф малого водосбора, а также исследовал нелинейные эффекты полученного решения

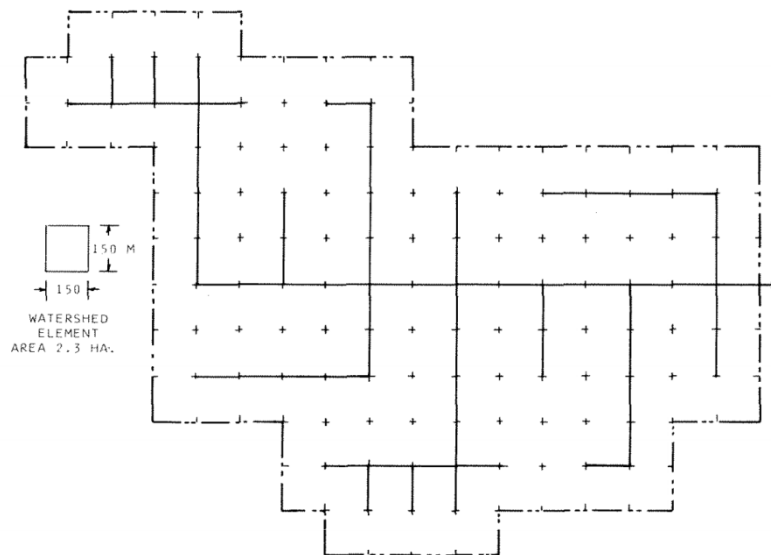
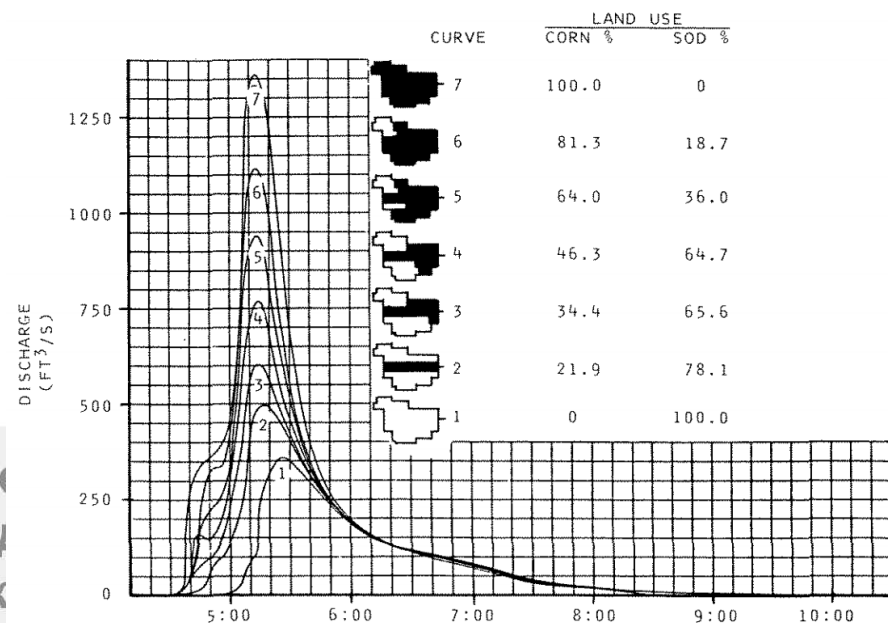
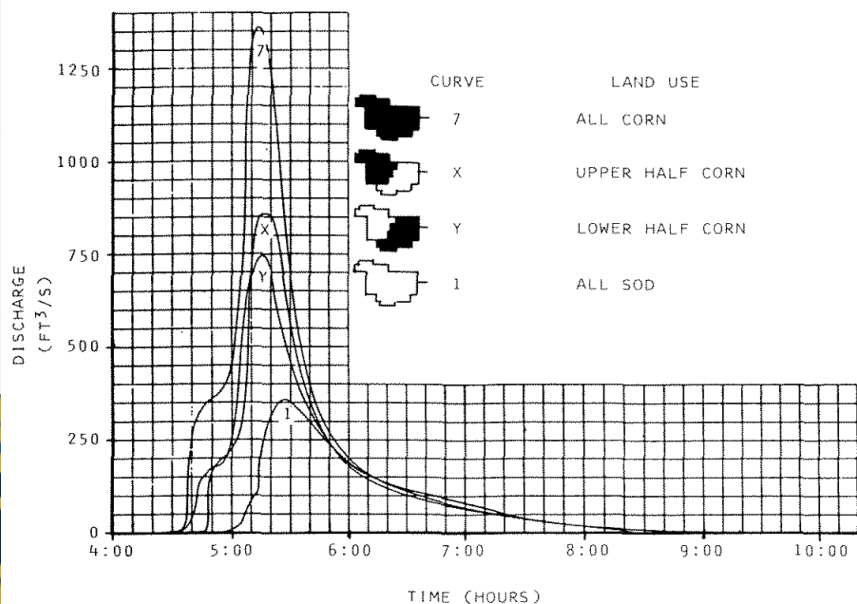


FIGURE 1. Synthetic basin used by Bernard. A total area of 290 ha is obtained by assembling 128 elements.



1950-1960-е годы: внедрение в гидрологию речных бассейнов результатов теории динамических систем, создание первых численных (концептуальных) моделей формирования речного стока, разработка первых физико-математических моделей гидрологических процессов

Этап характеризуется развитием **теории линейных динамических систем** применительно к исследованию процессов формирования речного стока и движения паводковой волны по речному руслу. В числе наиболее крупных достижений этого этапа – теоретическое обоснование мгновенного единичного гидрографа как отклика линейной динамической системы речного бассейна на единичный импульс, и нахождение связи параметров единичного гидрографа с морфометрическими и гидравлическими параметрами водосбора и речного русла (Nash, 1957; Калинин, Милюков, 1957; Dooge 1959; Кучмент, 1968, 1969).

Речной бассейн рассматривается как линейная стационарная система с сосредоточенными параметрами



Связь между входной $q(t)$ и выходной величиной $Q(t)$ описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$a_n \frac{d^n Q}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dQ}{dt} + a_0 Q = b_m \frac{d^m q}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dq}{dt} + b_0 q$$

При нулевых начальных условиях решение - интеграл Дюамеля

$$Q(t) = \int_0^t P(t - \tau) q(\tau) d\tau$$

$P(t)$ - функция влияния (в гидрологии – «мгновенный единичный гидрограф»)



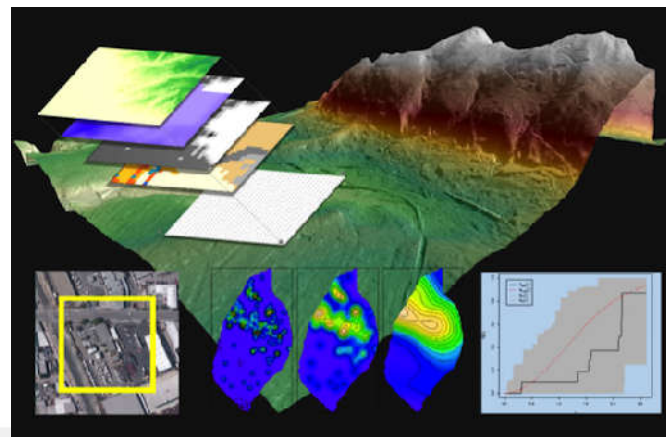
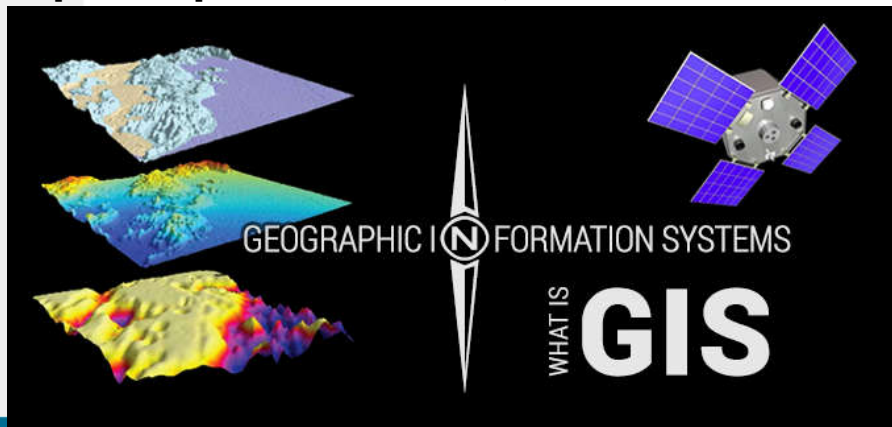
1950-1960-е годы

Развитие теории и математического описания процессов инфильтрации воды в почву (модели А.И. Будаговского (1955) и Дж. Филипа (Philip, 1957)), **гидрофизики почв** (Chailds, Collis-George, 1950; Miller, Miller, 1956; Brooks, Corey, 1964, и др.), **эвапотранспирации** (Monteith, 1965)

Фундаментальные результаты по исследованию и моделированию процессов формирования талого стока
физические свойства снежного покрова и факторы его формирования в различных физико-географических условиях (Кузьмин, 1957, 1960, 1961)
инфильтрация воды в мерзлую почву, теплофизические свойства почвогрунтов (Комаров, 1957, Павлов, 1965; Иванов, 1969)

1950-1960-е годы

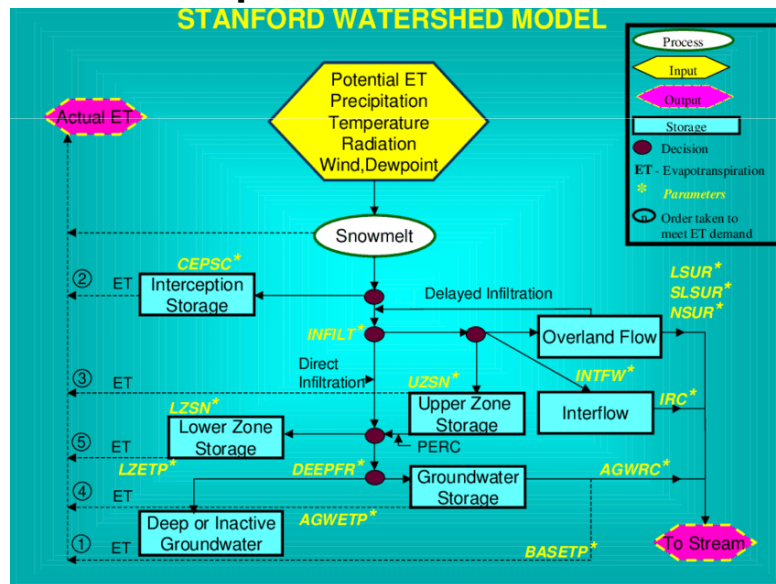
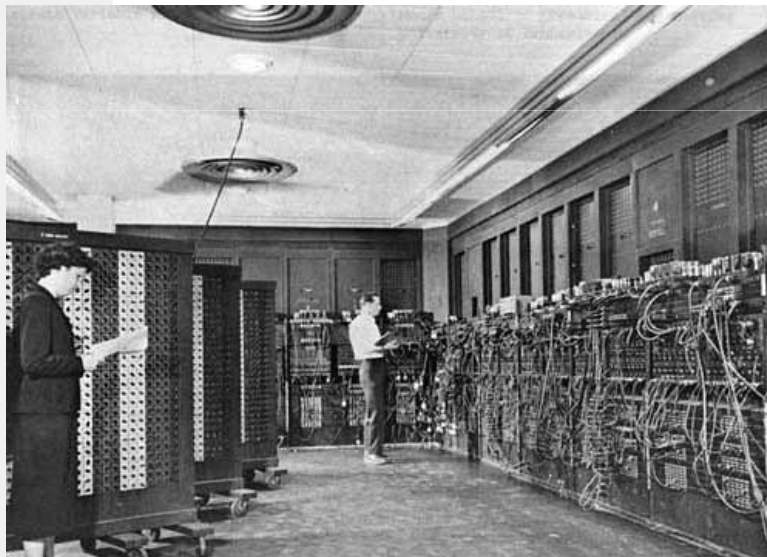
Ключевую роль в широком использовании через 30-35 лет методов скейлинга в гидрологических моделях (перехода от описания процессов на одних пространственных масштабах к другим; см. ниже) сыграло создание **теоретических основ объективного анализа полей пространственных переменных** (Гандин, 1963) и **геостатистики** (Матерон, 1968), развитых впоследствии для геофизических задач в (Journel, Huijbregts, 1978). Эти методы широко применяются в современных гидрологических моделях для интерполяции между пунктами измерений метеорологических воздействий на водосбор и параметров моделей, описания их подсеточной изменчивости.



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1950-1960-е годы

Появление в 1960-х гг. быстродействующих ЭВМ и алгоритмических языков программирования высокого уровня открыло широкие возможности для создания численных концептуальных гидрологических моделей, в которых составляющие гидрологического цикла речного бассейна были представлены в виде отдельных расчетных блоков, при математическом описании которых в той или иной степени учитывались накопленные в течение предшествующих десятилетий представления о гидрологических процессах.



Crawford, Norman & Burges, Stephen. (2004). HISTORY OF THE STANFORD WATERSHED MODEL. Water Resources Impact 6(2), 3-5

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1950-1960-е годы

В 1960-х годах появилось большое число концептуальных моделей схожей структуры (Explicit Soil Moisture Accounting (O'Connell, 1991)): SSARR (Rockwood, 1964), TANK (Sugavara, 1967), HEC-1 (Hydrologic..., 1968), и многие другие.

Сейчас на основе некоторых из этих моделей созданы современные программные продукты, которые используются для решения инженерных задач (USGS Precipitation-Runoff Modelling System (PMRS) (Leavesley et al., 2002), Imperial College Rainfall-Runoff Modelling Toolbox (Wagener et al., 2004), FLEX (Fenicia et al., 2008).

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1950-1960-е годы

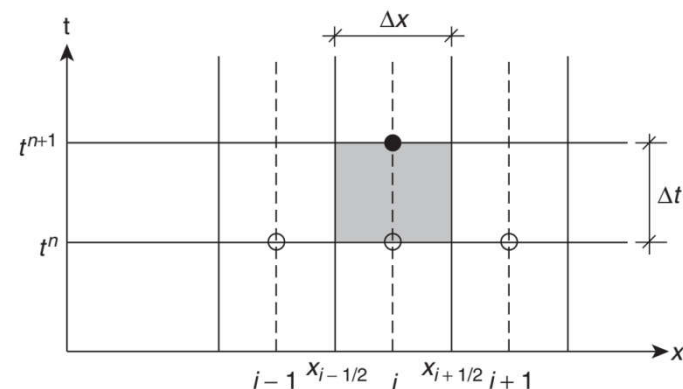
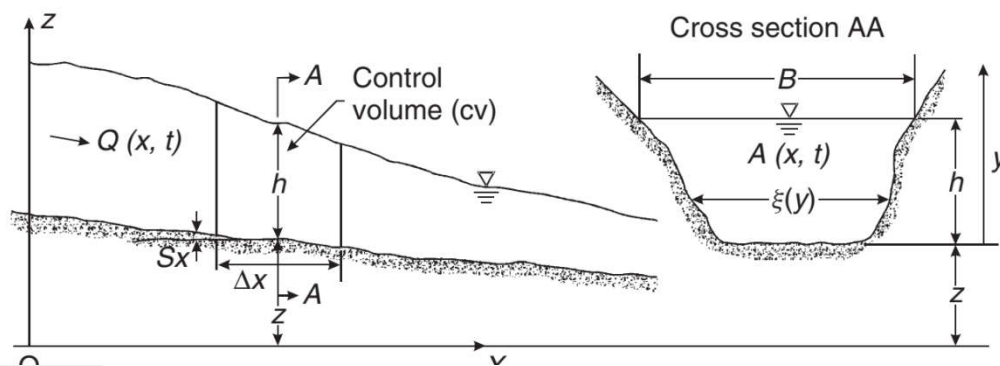
Рост вычислительных ресурсов стимулировал в 1960-х гг. разработку новых численных методов решения нелинейных уравнений в частных производных и **появление первых физико-математических моделей гидрологических процессов с распределенными параметрами.**

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) - B \frac{Q^2}{A^2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

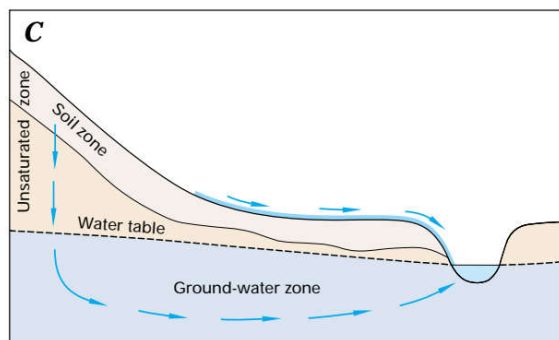
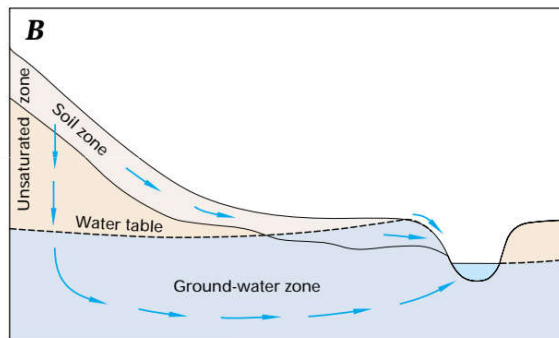
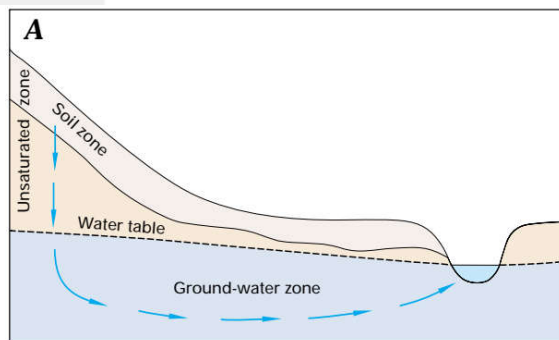
$$= gA(S_x - S_f) + q \left(U_q - \frac{Q}{A} \right) + \frac{Q^2}{A^2} A_x^y$$

Наибольшее развитие в эти годы получили физико-математические модели неустановившегося движения воды в речных руслах, основанные на решении системы одномерных уравнений Сен-Венана (работы отечественных специалистов: Калинин, Кучмент, 1963; Васильев и др., 1963; Воеводин и др., 1965; Корень, Кучмент, 1967; Картвелишвили, 1968; Грушевский, 1969)



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1950-1960-е годы



Появились первые публикации, посвященные разработке физико-математических моделей, описывающих взаимодействие поверхностных, почвенных и грунтовых вод на склонах речного водосбора (например, Guitjens and Luthin, 1965; Freeze and Witherspoon, 1966; Woolhiser and Liggett, 1967; см. также библиографию в Paniconi, Putti, 2015). При разработке большинства этих моделей авторы использовали упрощающие допущения при формализации этого сложного, существенно нелинейного процесса, задании краевых условий и параметров, описании пространственных неоднородностей, геометрии расчетной области и т. п.; определенные ограничения накладывались также возможностями существующих в то время численных схем и быстродействием компьютеров.

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1950-1960-е годы

Таким образом, в течение 1960-х гг. гидрологическое сообщество совершило прорыв в области создания численных моделей, описывающих основные процессы гидрологического цикла речного бассейна и их взаимодействие при формировании речного стока. В ряде публикаций того времени явно обозначилась тенденция к созданию физически обоснованных гидрологических моделей, а в таких областях, как описание движения воды в речном бассейне и руслах рек, а также взаимодействия поверхностных и подземных вод, – к созданию детальных физико-математических моделей с распределенными параметрами.

Journal of Hydrology 9 (1969) 237-258; © North-Holland Publishing Co., Amsterdam
Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher

BLUEPRINT FOR A PHYSICALLY-BASED, DIGITALLY-SIMULATED HYDROLOGIC RESPONSE MODEL

R. ALLAN FREEZE

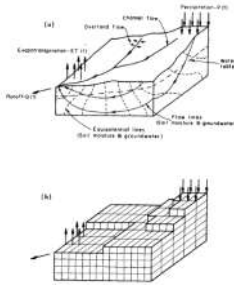
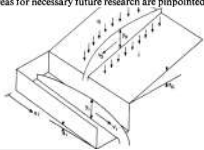
Inland Waters Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Calgary, Alberta, Canada

and

R. L. HARLAN

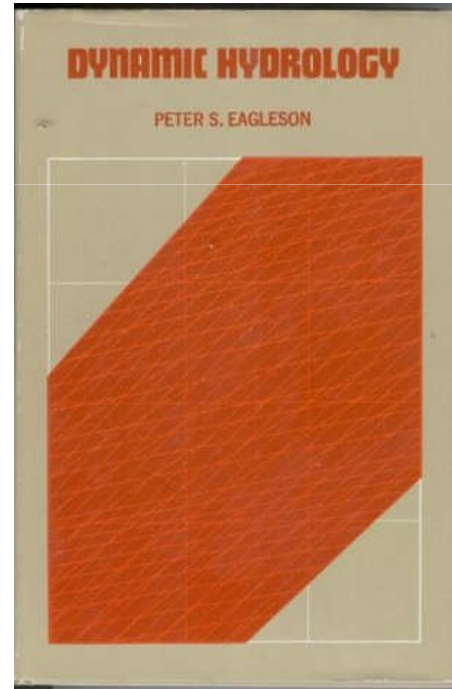
Forestry Branch, Department of Fisheries and Forestry, Calgary, Alberta, Canada

Abstract: In recent years hydrologists have subjected the various subsystems of the hydrologic cycle to intensive study, designed to discover the mechanisms of flow and to arrive at physical and mathematical descriptions of the flow processes. As a consequence, meaningful results are now available in the form of numerical solutions to mathematical boundary value problems for groundwater flow, unsaturated porous media flow, overland flow, and channel flow. These developments in physical hydrology, together with the tremendous advance in digital computer technology, should provide the impetus for a necessary redirection of research in hydrologic simulation. The development of physically-based hydrologic response models of the type described here is a sophisticated task that can be achieved with presently available techniques. Areas for necessary future research are pinpointed.



$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\rho g \beta \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \frac{\rho g}{k} [(1 - \theta) \alpha + \theta \beta] \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$



Кучмент Л. С.
Математическое моделирование речного стока. Л., Гидрометеиздат, 191 с.

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1970-1980-е годы создание теории и практики физико-математического моделирования формирования речного стока; совершенствование концептуальных моделей

Развитие концептуальных моделей формирования речного стока.

Наряду с разработкой моделей с сосредоточенными параметрами, построенными на идеологии Стэнфордской модели, таких, например, как востребованные и сегодня модели Sacramento (США), UBC (Канада), RORB (Австралия), стали создаваться модели, в которых пространственное распределение гидрологических процессов описывалось с использованием априорных представлений о распределении вероятности или моментах распределения параметров модели и/или входных величин.

Первая модель, учитывающая в параметрической форме пространственное распределение характеристик водосбора, была разработана В. И. Корнем и Л. С. Кучментом (1971). С использованием теорем о числовых характеристиках функций случайных величин авторы выполнили усреднение процессов формирования стока и переход от их описания на элементарной площадке ко всей водосборной площади.

Задача 2.

Слой стока за паводок на однородной элементарной площадке выражается формулой $Y=kP$, где k – коэффициент стока, P – слой выпавших осадков. Осадки и коэффициент стока неравномерно распределены по площади водосбора. Зная средние значения и дисперсии осадков и коэффициента стока, а также коэффициент корреляции между ними, найти среднее значение слоя стока с водосбора (использовать теоремы о числовых характеристиках случайных величин из курса теории вероятности)

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

1970-1980-е годы

Первые работы по усвоению математическими моделями формирования речного стока данных спутникового зондирования земной поверхности

Разработка специфических методов калибровки гидрологических моделей (оптимизации параметров) O'Connell et al., 1970; Neuman, 1973; Cooley, 1977; Kuczera, 1983

Проблемы тестирования гидрологических моделей при их использовании для расчетов речного стока при изменениях природных и антропогенных условий его формирования, а также расчетов стока с неизученных водосборов (Klemeš, 1986).

Г. П. КАЛИНИН

ОТ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ
СНИМКОВ
К ПРОГНОЗАМ
И РАСЧЕТАМ СТОКА

Контрастный оригинал



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1974

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

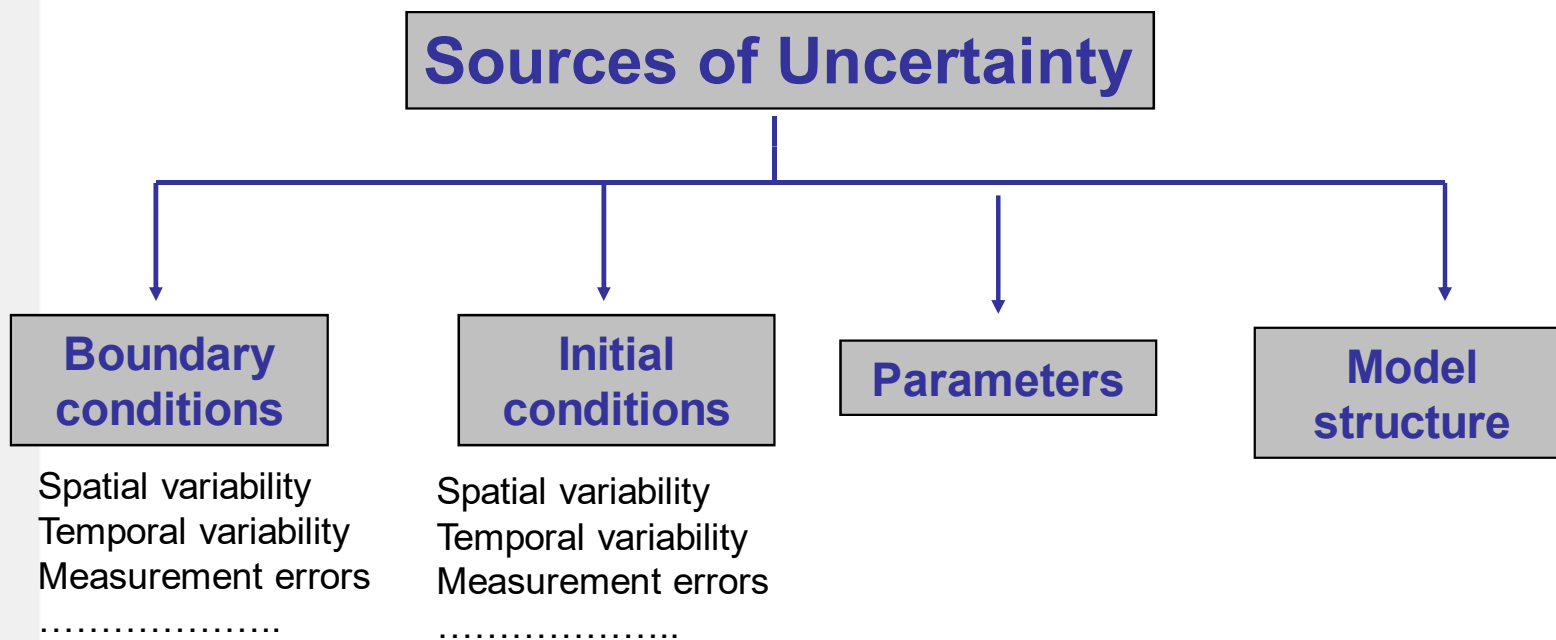
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

1970-1980-е годы

Первые динамико-стохастические модели формирования речного стока

Whatever detailed deterministic, physically based model supplied with all needed data would be developed, the uncertainty still remains indescribable by the developed model over some spatial-temporal scales.

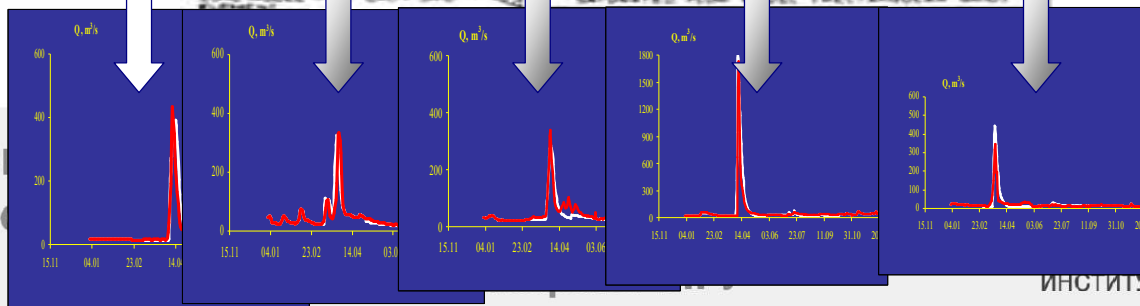
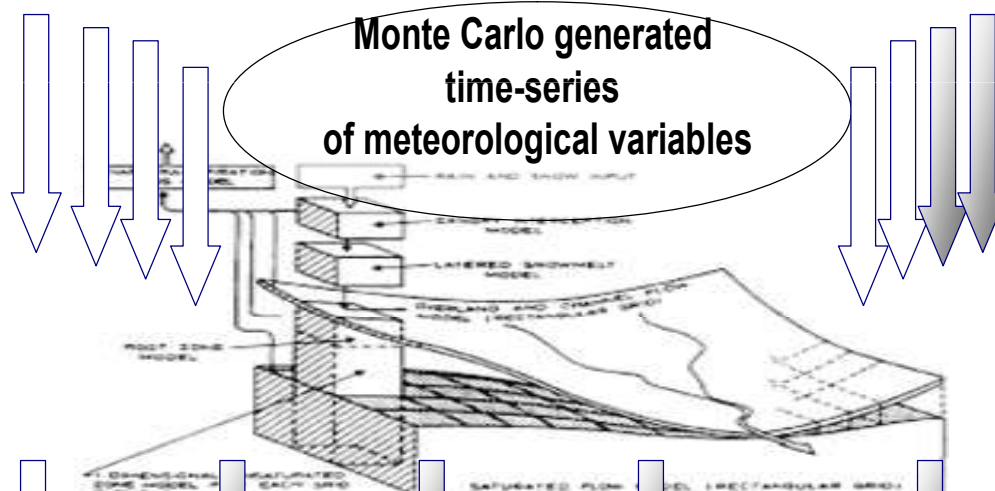


«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ



1970-1980-е годы

Первые динамико-стохастические модели формирования речного стока со случайными входами (Eagleson, 1972; 1978; Кучмент и др., 1983; Гельфан, 1989)



Эволюция математических моделей в гидрологии



«Ф
пр

ВП
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

1970-1980-е годы

Большое число работ опубликовано в этот период в области физико-математического описания отдельных процессов гидрологического цикла речного бассейна. Эти работы составили фундамент развития научной гидрологии

Гидродинамические модели поверхностного склонового стока на основе двумерных уравнений мелкой воды (Демидов, Кучмент, 1975), двумерных уравнений кинематической волны (Кучмент, Трубихин, 1978), адвективно-диффузионного уравнения (Govindaraju et al., 1988)

Первые отечественные модели, описывающие взаимодействия поверхностного и подповерхностного механизмов стекания воды в речную сеть при формировании дождевого стока (Кондратьев, 1980; 1981; Смахтин, 1988)

Важнейшие результаты в области гидрофизики почв: модели вертикального тепло- и влагопереноса в ненасыщенной зоне почвы, оценки гидрофизических характеристик почв по данным о почвенно-гидрологических константах (Muallem, 1976; Clapp and Hornberger, 1978; Мотовилов, 1980; van Genuchten, 1980; Russo, 1988)

1970-1980-е годы

Большое число работ опубликовано в этот период в области физико-математического описания отдельных процессов гидрологического цикла речного бассейна. Эти работы составили фундамент развития научной гидрологии

Первые физико-математические модели процессов вертикального тепло-влажнопереноса в системе почва-растительность, ставшие впоследствии основными расчетными блоками широкого класса численных моделей взаимодействия поверхности суши с атмосферой (Brutsaert, 1982; Deardorff, 1978; Sellers et al., 1986, первая отечественная модель этого класса (Мотовилов, Старцева, 1985)))

Первые детальные физико-математические модели процессов тепло- и влажнопереноса в снежном покрове во время его формирования и снеготаяния (Anderson, 1976; Morris, 1983; Motovilov, 1986,), в мерзлой почве при инфильтрации в нее талой воды (Harlan, 1972; Мотовилов, 1977; Кулик 1978; Зарецкий, Лавров, 1986; Гусев, 1993), а также процессов промерзания и оттаивания почвы с учетом миграции влаги к фронту промерзания (Жмаева, Кучмент, 1979; Лыкосов, Палагин, 1980, Палагин, 1981; Гельфан, 1989), формирования в почве водонепроницаемых ледяных слоев (Романов и др., 1974; Мотовилов, 1978; Калюжный, Павлова, 1981)

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

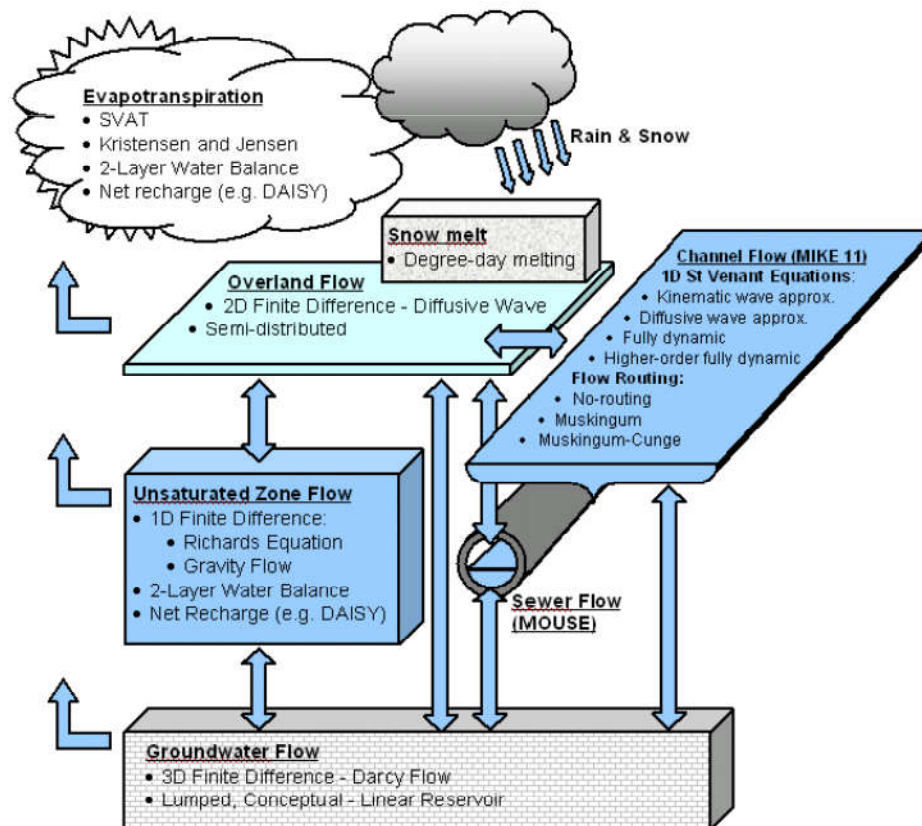
1970-1980-е годы

Накопление знаний и эмпирических данных, наряду с продолжающимся стремительным ростом вычислительных ресурсов, создали возможности для реализации сформулированной в конце 1960-х годов идеи (Freeze, Harlan, 1969; Eagleson, 1970; Кучмент, 1972) о создании численной модели гидрологического цикла речного бассейна, объединяющей модели отдельных процессов, основанной на базовых физических принципах, обеспечивающей возможность задания распределенных по площади входных метеорологических воздействий и параметров, большая часть которых может быть задана априори по имеющимся данным измерений, без использования методов калибровки.

Système Hydrologique Européen (SHE) –IH (UK), SOGREAH (France), DHI (Denmark)
(Abbot et al., 1986)

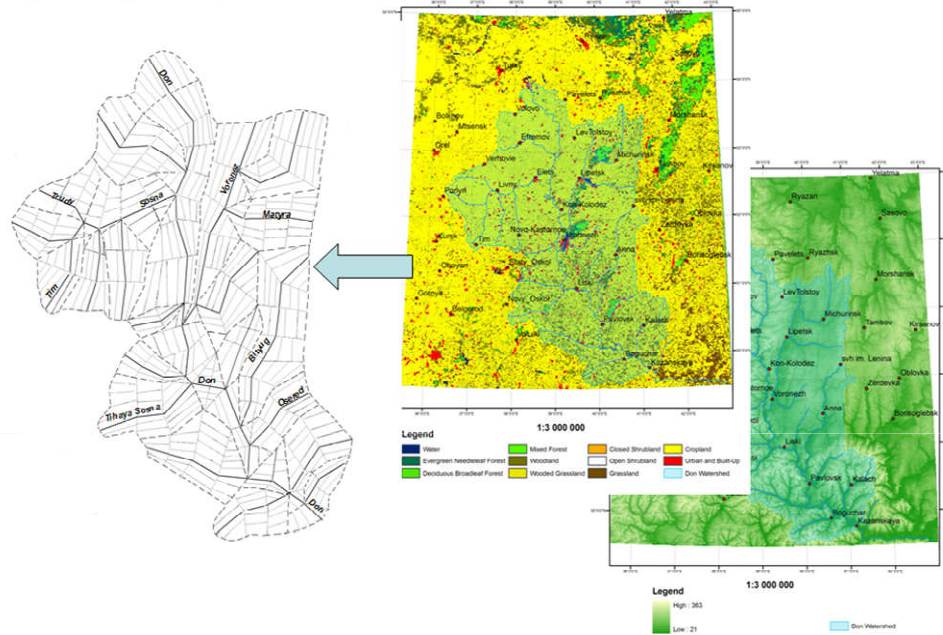
Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM)
Beven, Calver and Morris (1987)

Система физико-математических моделей ИВП РАН (Кучмент, Демидов, Мотовилов, 1983; Kuchment et al., 1986; Кучмент, Гельфан, 1993)



Система ИВП РАН физико-математических моделей гидрологического цикла

Конечноэлементная дискретизация водосборной площади учитывает характер рельефа, типы почв, растительности, землепользования



Русловой сток

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{(u - u_q)q}{F} = g(i_0 - i_f)$$

$$\frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(hB)}{\partial t} = q$$

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

Поверхностный склоновый сток

$$\frac{\partial(hB)}{\partial t} + \frac{\partial(qB)}{\partial x} = q_c$$

$$q = i^{0.5} h^{1.67} B n^{-1}$$

Подповерхностный сток

$$(\theta_m - \theta_f) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = G$$

$$q = K(H) i_0 h$$

$$K = K_0 \exp(-\phi H)$$



Система ИВП РАН физико-математических моделей гидрологического цикла

Формирование снежного покрова и снеготаяние

Интенсивность снеготаяния

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial I_s}{\partial t} = \frac{\partial K_s}{\partial z}$$

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \chi \rho_i \frac{\partial I_s}{\partial t}$$

$$M = \begin{cases} \left(Q_a - \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=H} \right) (\rho_w \chi)^{-1}, & Q_a > \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=H} \\ 0, & Q_a \leq \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=H} \end{cases}$$

Фазовые переходы внутри снежного покрова

Поток тепла на поверхности снега

$$\frac{\partial I_s}{\partial t} = \begin{cases} \frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{\partial K_s}{\partial z}, T_s < 0 \\ -\frac{1}{\rho_i \chi} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right), T_s = 0 \end{cases}$$

$$Q_a = Q_{sw} + Q_{lw} - Q_{ls} + Q_T + Q_E + Q_P$$

Вертикальный тепло- и влагоперенос в мерзлой почве

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_I \frac{\partial I}{\partial z} - K \right)$$

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_w c_w \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_I \frac{\partial I}{\partial z} - K \right) \frac{\partial T}{\partial z} + \rho_w \chi \frac{\partial W}{\partial t}$$

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ



1990-2000-е годы

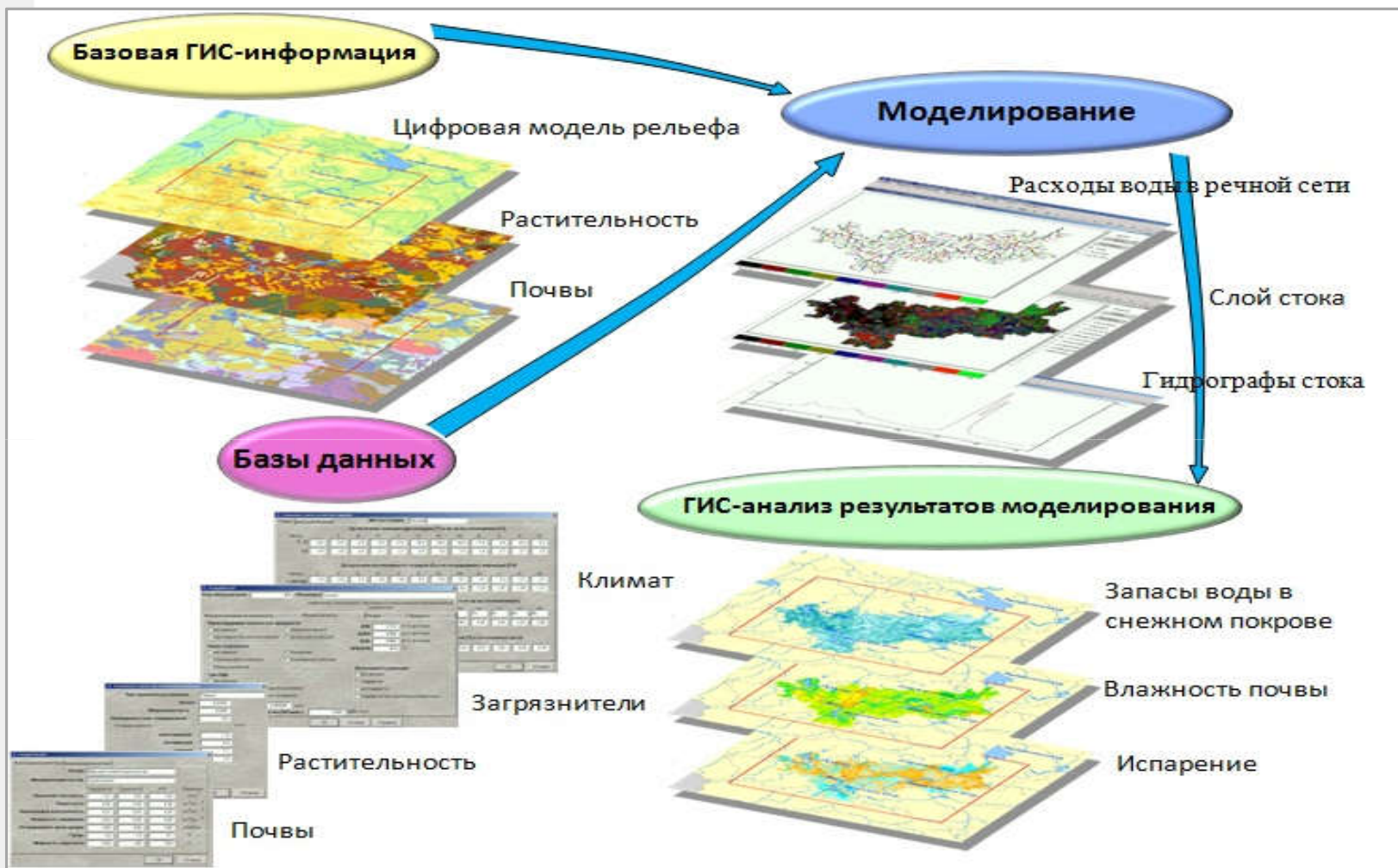
1990-2000-е годы: развитие методов моделирования пространственной неоднородности, скейлинга гидрологических процессов, методов исследования моделей (анализа чувствительности, неопределенности), их применимости для расчетов в отсутствие гидрологических данных, внедрение новых источников данных и информационных технологий их обработки

1990-2000-е годы

Продолжилось развитие детальных физико-математических моделей с распределенными параметрами, при разработке которых для описания пространственной изменчивости входных величин и параметров, подсеточной изменчивости и построения расчетной сетки стали широко применяться технологии ГИС.

Современная версия модели IHDM Института гидрологии Великобритании (Calver and Wood, 1995), созданные австралийскими специалистами модели THALES (Grayson *et al.*, 1995) и CSIRO TOPOG (Vertessy *et al.*, 1993), модели, созданные в США, среди которых модель InHM (Integrated Hydrologic Model; Van der Kwaak, Loague, 2001), GSSHA (Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis; Downer *et al.* (2005)), а также в других странах - CATHY (Bixio *et al.*, 2002;), tRIBS (Ivanov *et al.*, 2004), MODHMS (Panday and Huyakorn, 2004), HydroGeoSphere (Jones *et al.*, 2008), ParFlow (Kollet, Maxwell, 2006), GEOTop (Rigon *et al.*, 2006), PIHM (Qu, Duffy, 2007) CRHM (Pomeroy *et al.*, 2007). **Массовая разработка физико-математических моделей и многочисленные примеры их успешного применения позволили в 2000-е гг. говорить уже о появлении стандартных технологий построения таких моделей (Refsgaard *et al.*, 2010).**

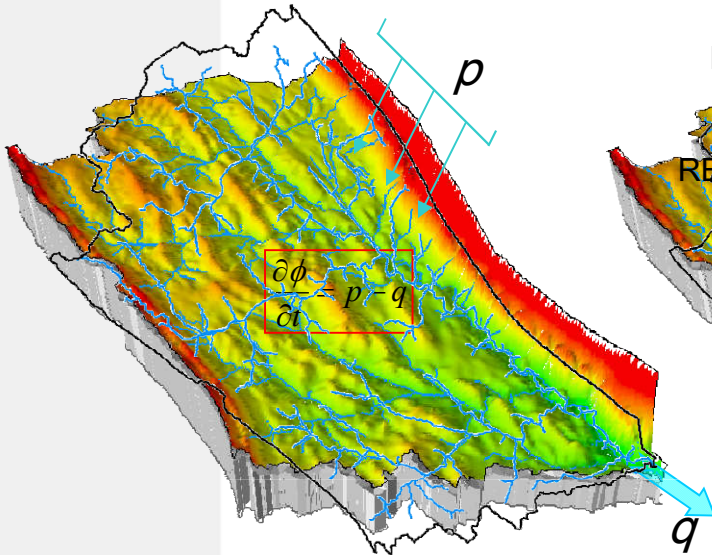
1990-2000-е годы



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

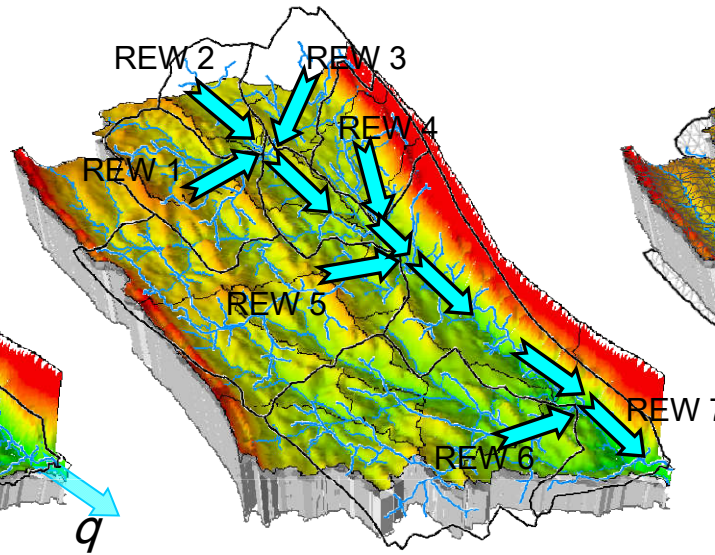
Разделение моделей по степени учета пространственной неоднородности исходной информации

Lumped Model



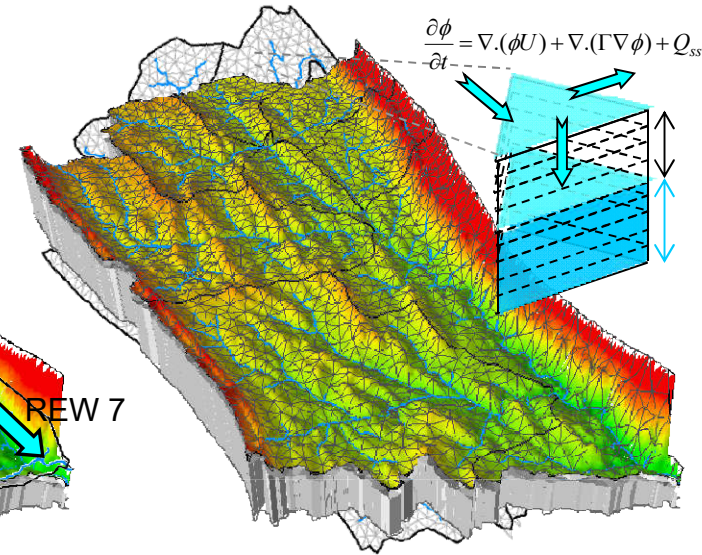
e.g: Stanford Watershed Model

Semi-Distributed Model



e.g: ECOMAG, Hydrograph, SWAP

Distributed Model



e.g: SHE, InHM, WPI System

Process Representation:

Parametric

Physics-Based

Predicted States Resolution:

Coarser

Fine

Data Requirement:

Small

Large

Computational Requirement:



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

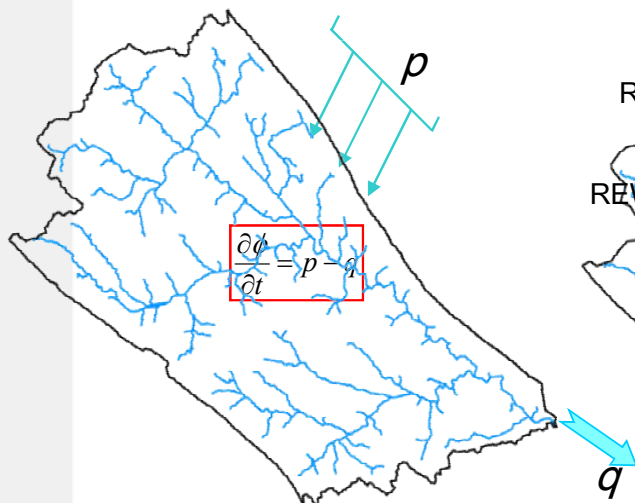
с 1967 года

Введение: о предмете лекции

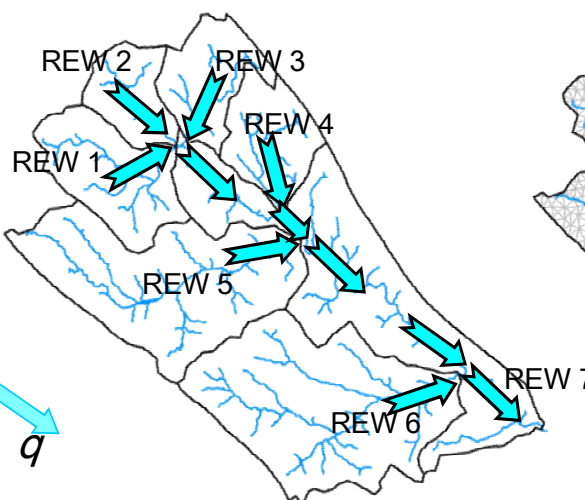
Ввиду невозможности охватить все разнообразие путей развития существующих моделей, мы ограничимся описанием лишь определенных их классов, а именно:

детерминистических численных моделей формирования речного стока, относящихся к классам концептуальных моделей с сосредоточенными и полураспределенными параметрами, а также физико-математических моделей с полураспределенными и распределенными параметрами.

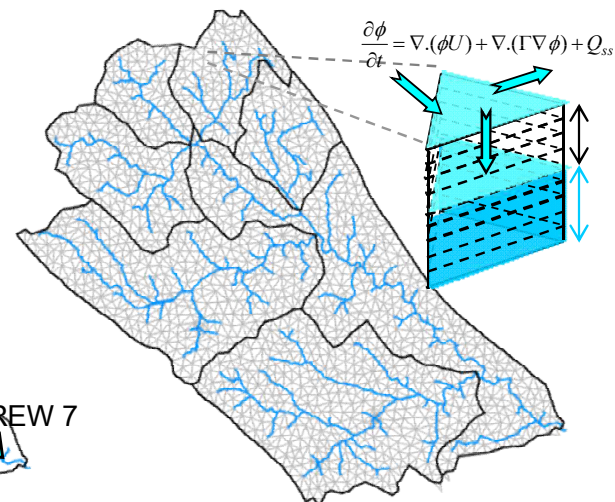
Lumped Model



Semi-Distributed Model



Distributed Model



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

1990-2000-е годы

Помимо дальнейшего развития физико-математических моделей с распределенными параметрами выделяются достижения рассматриваемого периода, которые связаны

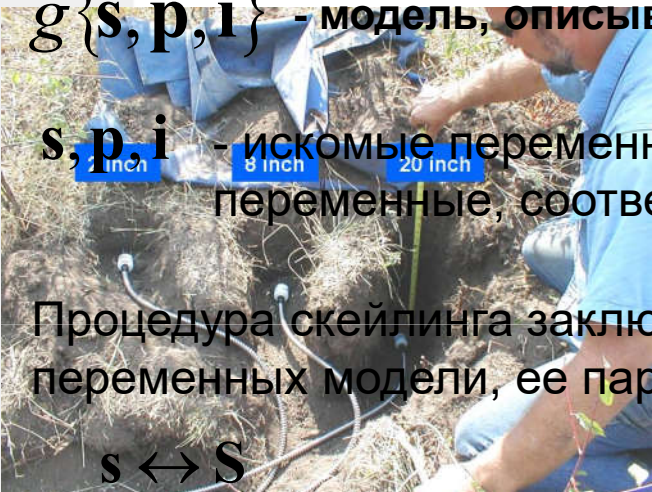
- с развитием методов математического описания пространственных полей гидрологических переменных речных бассейнов, включая скейлинг,
- с развитием концепции репрезентативной элементарной области,
- с созданием новых методов схематизации водосбора и описания поверхностного стока на основе новых технологий (цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ГИС),
- с расширением применения данных дистанционного зондирования земной поверхности при построении гидрологических моделей
- с широким распространением методов анализа неопределенности результатов моделирования

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

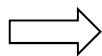
1990-2000-е годы

Проблема скейлинга

$10^{-1}-10^0$ м
 $g\{s, p, i\}$ - модель, описывающая процесс на микромасштабе



s, p, i - искомые переменные, параметры и входные переменные, соответственно

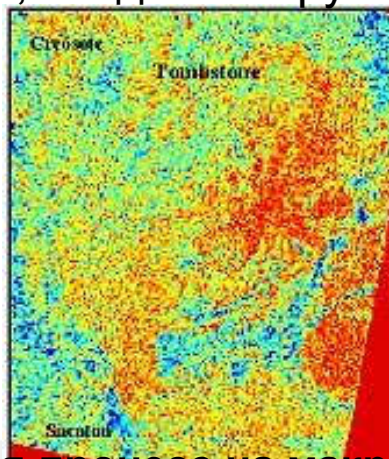


10^1-10^3 м



Процедура скейлинга заключается преобразовании переменных модели, ее параметров, входов и структуры

10^3-10^6 м



$$s \leftrightarrow S$$

$$p \leftrightarrow P$$

$$i \leftrightarrow I$$

$$g\{s, p, i\} \leftrightarrow G\{S, P, I\}$$

$G\{S, P, I\}$ - модель, описывающая процесс на макромасштабе

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ



После 2010 года

Последние годы характеризуются вниманием научного сообщества к эволюции гидрологических систем на климатических масштабах времени, вопросам предсказуемости их динамики, проникновением в гидрологические исследования достижений эволюционной географии, геоморфологии, почвоведения, а также изучением взаимообусловленного развития гидрологических систем и общества, вовлечением гидрологических исследований в решение глобальных задач устойчивого развития. Технологические достижения этого периода связаны с разработкой новых математических и технических средств обработки огромных массивов данных (“big data”), бурным развитием коммуникационных технологий, совершенствованием дистанционных методов измерений.

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ВОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ: ИСТОЧНИКИ УГРОЗ

Водная безопасность - обеспеченность населения устойчивым доступом к достаточному количеству воды приемлемого качества для поддержания достойного уровня жизни людей и социально-экономического развития, обеспечение охраны водных объектов от загрязнения, защиты от опасных гидрологических явлений, сохранения экосистем (*UNESCO-IHP, 2012. Final Report*)

Угрозы водной безопасности

Наводнения

Дефицит
водных
ресурсов и
загрязнение
природных вод

Низкое качество
питьевой воды
и ограниченный
доступ к
водоснабжению

«Физическое и математическое моделирование процессов в гидросредах» кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

¹Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н. (2015) Водная безопасность. Федеральный справочник № 29 Национальная безопасность России.

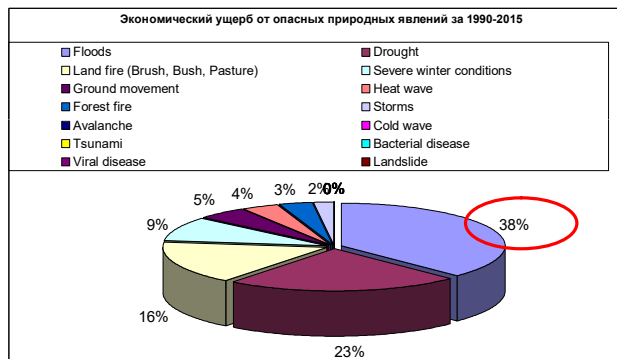
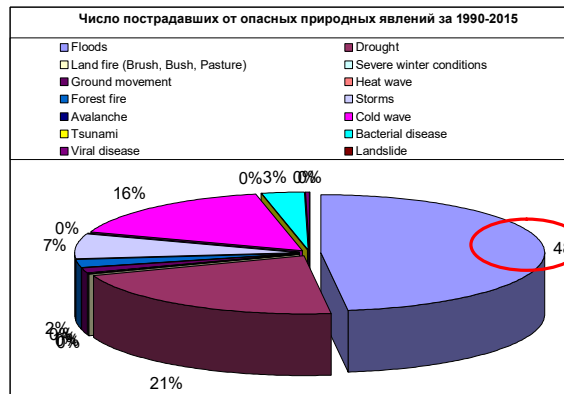
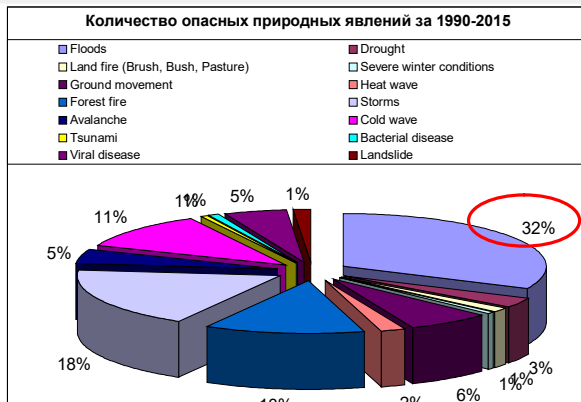
ИВП 
ФЕДЕРАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года



ИСТОЧНИКИ УГРОЗ: НАВОДНЕНИЯ



**С 1990 по 2014
годы суммарный
экономический
ущерб от
природных
катастроф
составил**

в России порядка 11.6 млрд. долларов (CRED), из них почти 4.5 млрд. – ущерб от наводнений

Факторы роста ущерба

Социально-экономические: рост населения на паводкоопасных территориях, увеличение расходов на восстановительные работы, страховые выплаты и т.п., сокращение сети наблюдений (на треть с 1980-х годов),

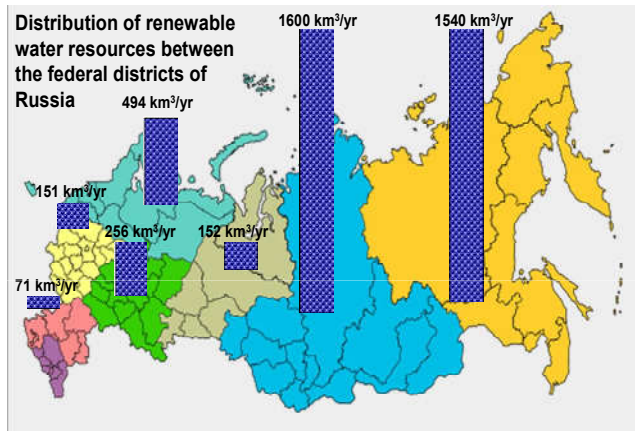
состояние ГТС (1500 из 9000 в опасном или неудовлетворительном состоянии)

Природные: рост масштаба и повторяемости экстраординарных наводнений вследствие изменение климата, увеличения антропогенной нагрузки на речные водосборы и русла рек (сведение лесов, сужение

ИСТОЧНИКИ УГРОЗ: ДЕФИЦИТ КОЛИЧЕСТВА И КАЧЕСТВА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

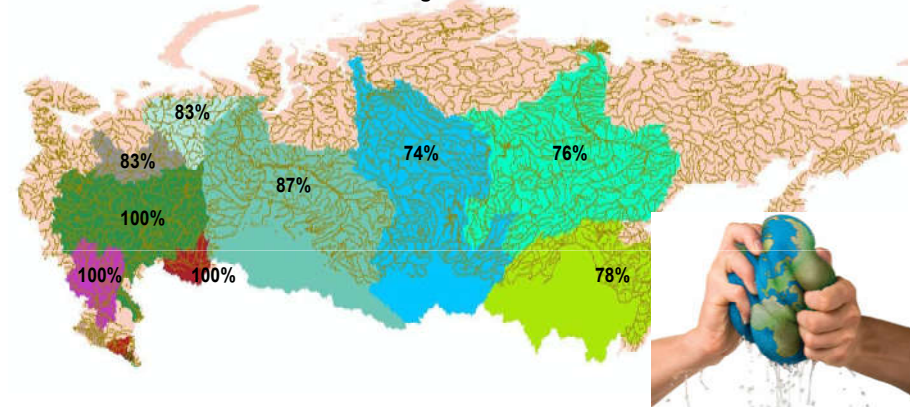
Водная безопасность: источники угроз

Климатически обусловленный дефицит

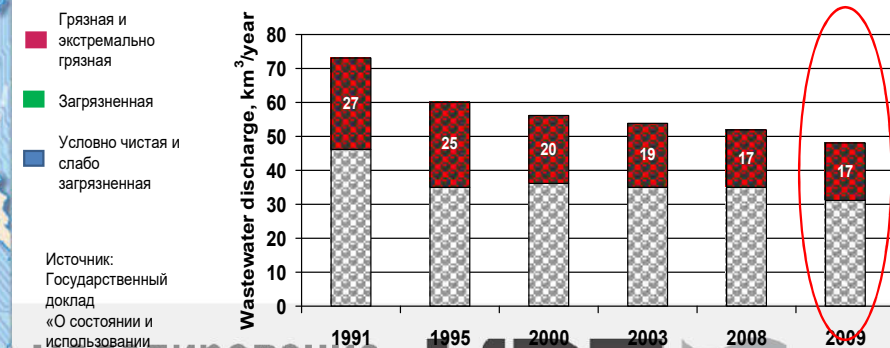


Экономически обусловленный дефицит

Ratio of water use (accounting for ecological demand) to renewable water resources in the largest river basins of Russia



Загрязнение природных вод



Более трети объема сточных вод попадают в водные объекты недостаточно очищенными

«Физика и вод суши физфака МГУ»

и вод суши физфака МГУ

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

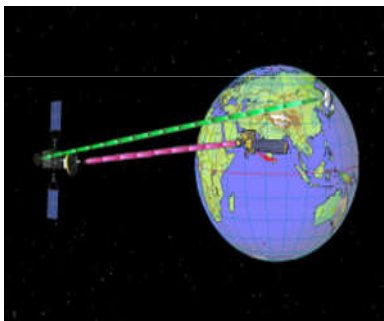
с 1967 года

ИНТЕГРАЦИЯ ДАННЫХ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

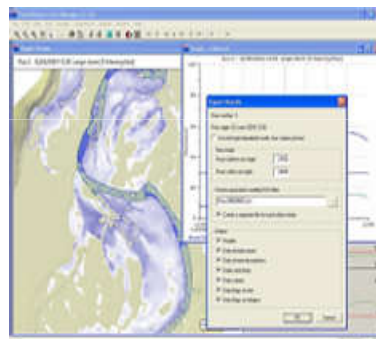
Данные → Модели → Знания → Решения



Данные наземных и дистанционных измерений

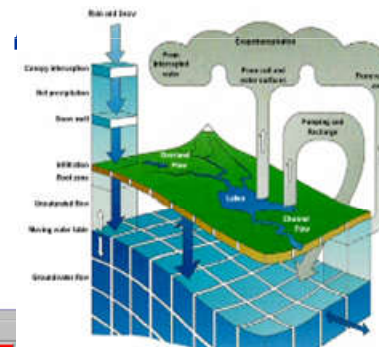


Численные модели погоды и климата



Application of Delta-FEWS for an European Flood Forecasting System (EFFS), showing forecast precipitation field over Europe for the 1995 event imported from the Danish Meteorological Institute

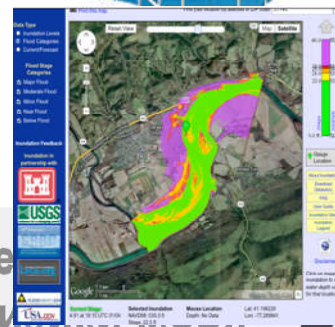
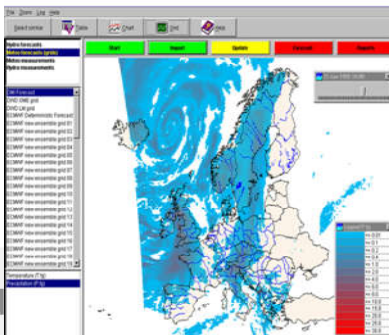
Интеграция с гидрологическими и моделями, ассимиляция



Поддержка принятия решений



Методическое обеспечение
противодействия угрозам водной
безопасности



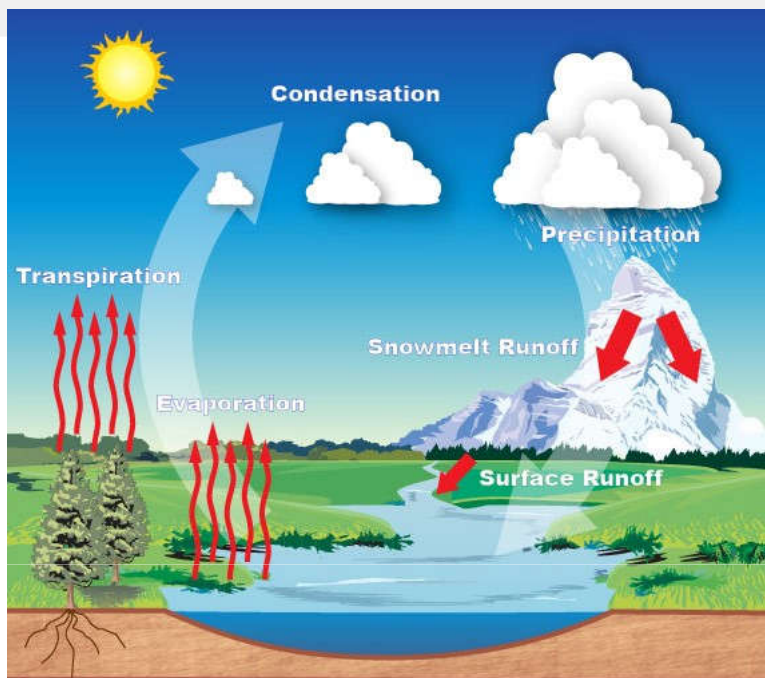
НАЦИОНАЛЬНАЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ - ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

<https://water.noaa.gov/about/nwm>

Сейчас прогноз водного режима по ~4000 створам из 8000



С помощью NWM будет выпускаться прогноз по 2.7 млн. точек на речной сети США



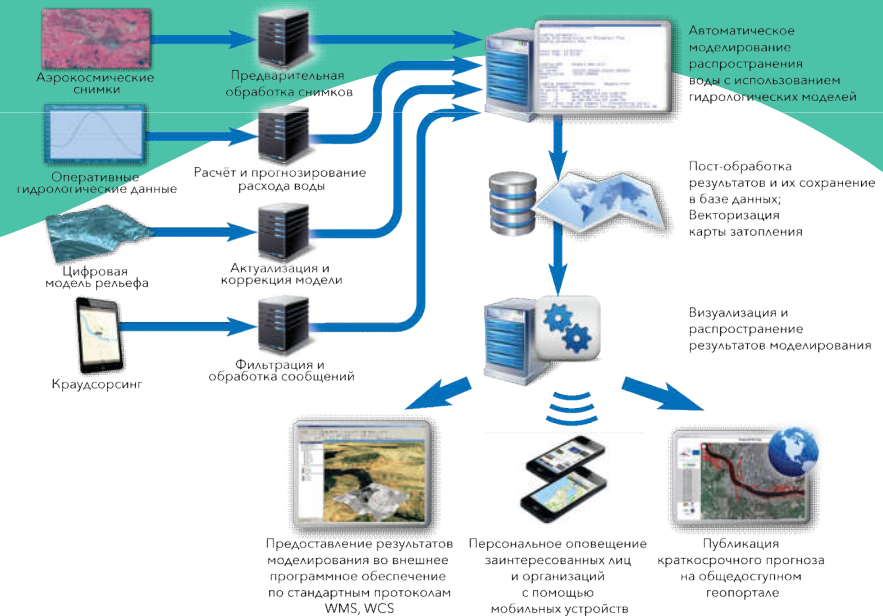
Transforming NOAA Water Prediction	
TODAY	THE FUTURE
Approximately 4000 forecast locations at points	Approximately 2,700,000 forecast stream reaches
Forecast river flow/stage	Forecast all hydrologic parameters which define the water budget
Driven by large catchment "lumped" modeling	Driven by high resolution Earth System modeling
Average basin size greater than 420 square miles	Average basin size ~1 square mile
Impact-based forecasts at selected points	Predictions linked with detailed local infrastructure data to communicate street level impacts
13 River Forecast Centers developing separate versions of the same regional model	NOAA, academia, and federal partners developing/evolving same national, community-based model
For the hydrology community, the implementation of the NWM and the leap ahead capability it provides parallels the implementation of mesoscale atmospheric models in the 1970s (i.e., model resolution substantially greater than available observational network)	

Weather-Ready Nation
National Oceanic and Atmospheric Administration

National Water Model
Improving NOAA's Water Prediction Services



ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ* НА БАЗЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ ИВП РАН



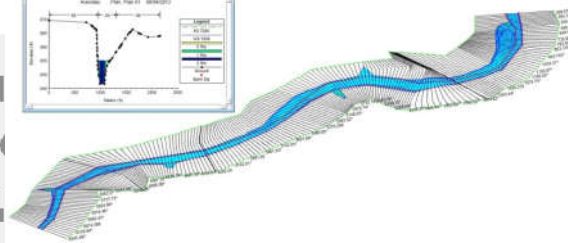
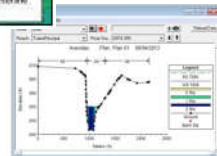
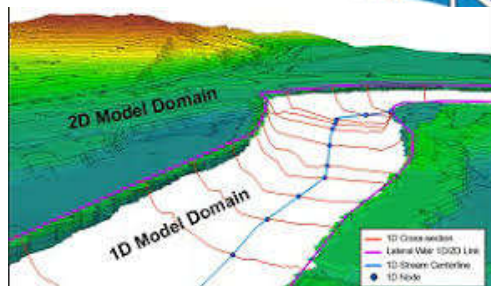
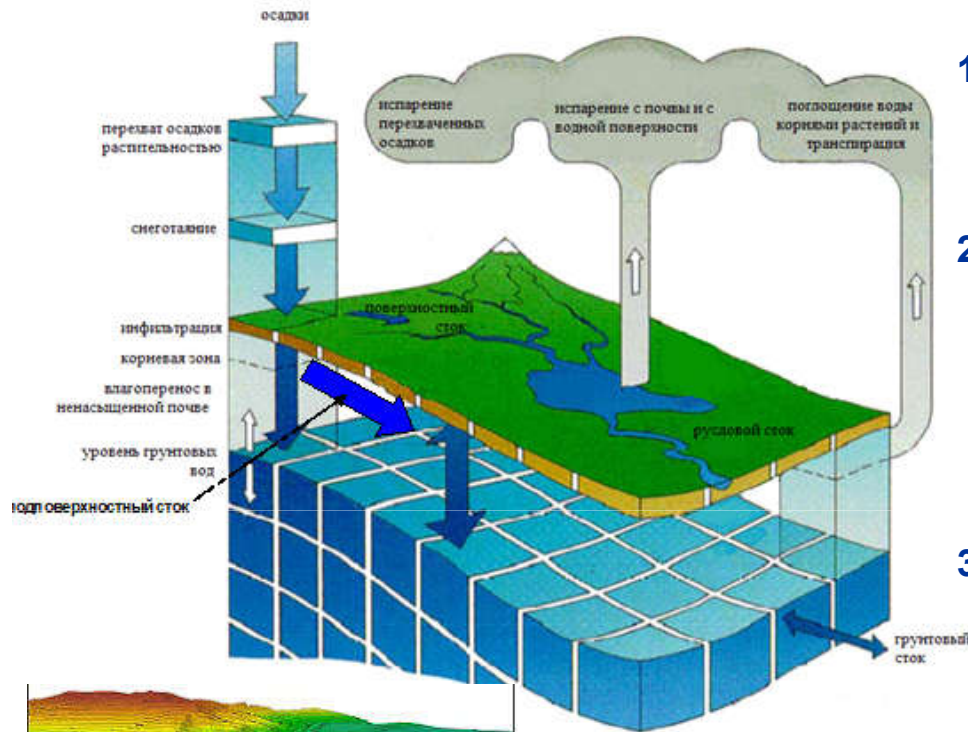
* «ГИМК – вычислительная технология, объединяющая в своей структуре физико-математические модели гидрологических процессов, базы данных для задания краевых условий и параметров моделей, геоинформационные системы для обработки пространственно распределенных исходных и расчетных данных, построения полей моделируемых гидрологических переменных» (Мотовилов, Гельфан, 2018)



Система гидрологических и гидролого-гидрохимических моделей ИВП РАН

МОДЕЛИ, СОЗДАННЫЕ В ИВП РАН:

1. Модели формирования речного стока (ECOMAG) и качества вод (ECOMAG-НМ)
2. Гидродинамические модели неустановившегося движения воды и распространения загрязнений в руслах рек (STREAM, STREAM-2D, DYNAMASS)
3. Модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой (SWAP)

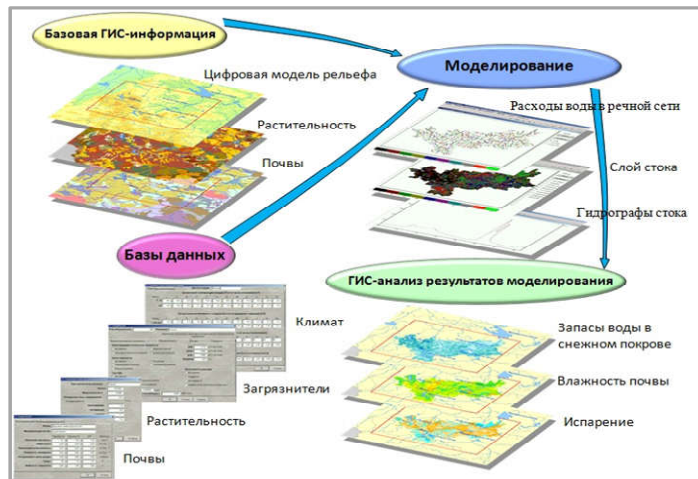


«Физическое и математическое моделирование процессов в географии и водных ресурсах»



ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЕСОМАГ*

Структура ГИМК ЕСОМАГ

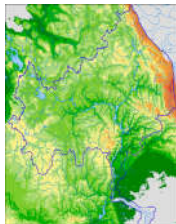


Информационные ресурсы



Картографические ресурсы

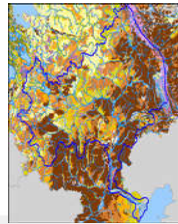
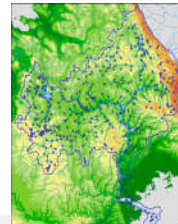
Цифровая модель рельефа Растительный покров Почвенная карта



Метеорологические станции

Гидрологические станции

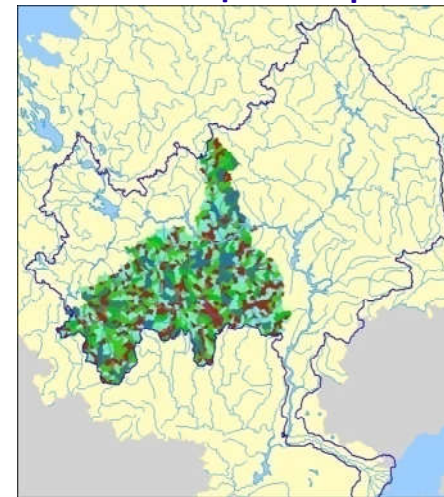
Ландшафты



Базы данных

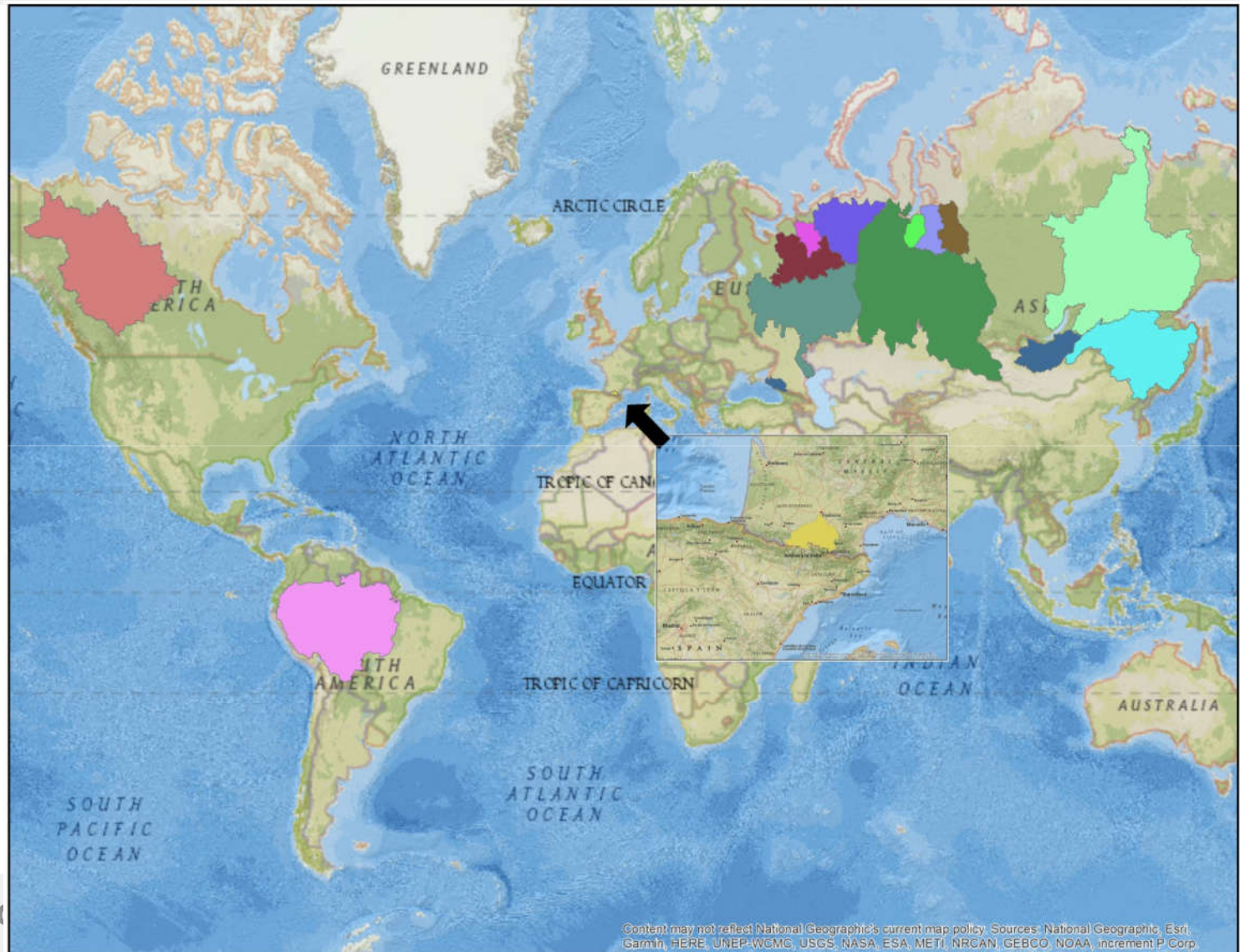
Change Record				
Физические свойства		Химические свойства		
Почва: Дерново-сильнопodzольстая				
Механический состав: Легкосуплинистая				
	Горизонт А	Горизонт В	УГВ	Единицы
Объемная плотность	1.32	1.50	1.50	г/см ³
Пористость	0.48	0.42	0.42	см ³ /см ³
Наименьшая влагоемкость	0.30	0.28	0.28	см ³ /см ³
Влажность завядания	0.05	0.08	0.08	см ³ /см ³
Коэффициент фильтрации	3.00	3.00	3.00	см/день
Гумус	3.0	1.0	0.1	%
Мощность горизонта	0.50	1.00	3.00	м

Схематизация по ЦМР



Motovilov Y. et al. (1999). ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Dep. Geoph. Univ. Oslo, Institute Report Series no 105, 86 p.
 «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря
 Motovilov Yu. et al.. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation, Agric. Forest Meteor., 1999, vol. 98–99, pp. 257–277

Модели формирования стока речных бассейнов, созданные на базе ИМК ЕСОМАГ



Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. (2018) Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., Изд. Российской академии наук, 300 с.



««

Процессов в геосредах» кафедра физики моря

и вод суши физфака МГУ

ИМКА АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ НАУЧНЫХ ПРОБЛЕМ с 1967 года

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ СЕМЕЙСТВА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ STREAM

Гидродинамическая модель STREAM2D

Программа предназначена для расчёта нестационарных течений.

В основе программы - двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана), описывающая плоские движения жидкости в горизонтальной плоскости:

$$h_t + (\vec{\nabla} \cdot \vec{w})h = 0$$
$$(h\vec{w})_t + (\vec{\nabla} \cdot \vec{w})h\vec{w} + gh\vec{\nabla}(h + z) = \vec{f}$$

где t – время; $\vec{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$;

x, y – координаты на горизонтальной плоскости;

$h = h(x, y, t)$ – глубина потока жидкости

$\vec{w} = \vec{w}(x, y, t) = (u, v)^T$ – вектор скорости, осреднённый по глубине потока;

g – ускорение свободного падения вдоль вертикального направления;

$z = z(x, y)$ – вертикальные отметки рельефа дна, который отсчитывается от какого-либо горизонтального уровня;

\vec{f} – учёт действия внешних сил, например силы Кориолиса или трения:

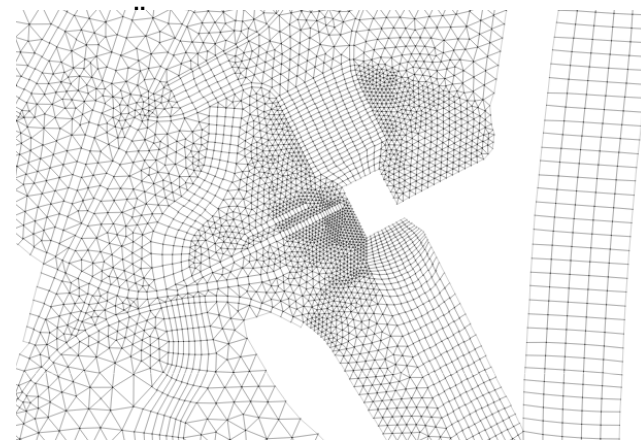
$$\vec{f} = \lambda \vec{w} |\vec{w}|/2,$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, в частности,

n – коэффициент шероховатости;

$(\vec{a} \cdot \vec{b})$ – скалярное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} .

В качестве расчётной сетки используются нерегулярные гибридные треугольно-



Основные граничные условия:

уровень, расход, $Q(h)$

Начальные условия:

Отметки дна, уровень воды, коэффициент шероховатости

Дополнительные модули:

Расчёт транспорта наносов, гидротермический модуль

Aleksyuk A.I., Belikov V.V. Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities. *Comput. Math. Math. Phys.* 2017. Vol. 57. No.2. P. 318–339

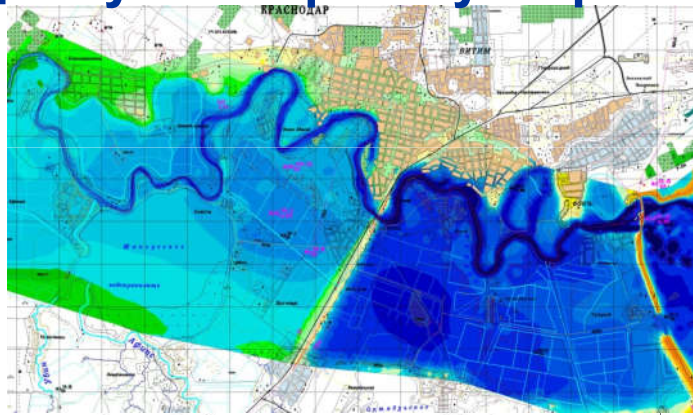
Belikov V., Krylenko I., Alabyan A., Sazonov A., Glotko A. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers. *Proc. IAHS*, 370, 69–74, 2015

Беликов В.В., Алексюк А.И., Норин С.В., Моделирование движения паводковых волн по селитебным территориям. *Гидротехническое строительство*. 2016. № 12. С. 15-21

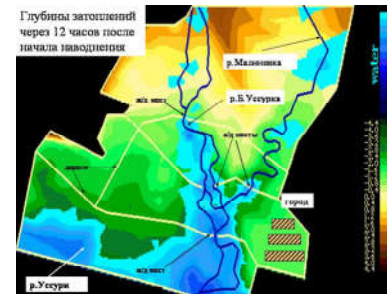
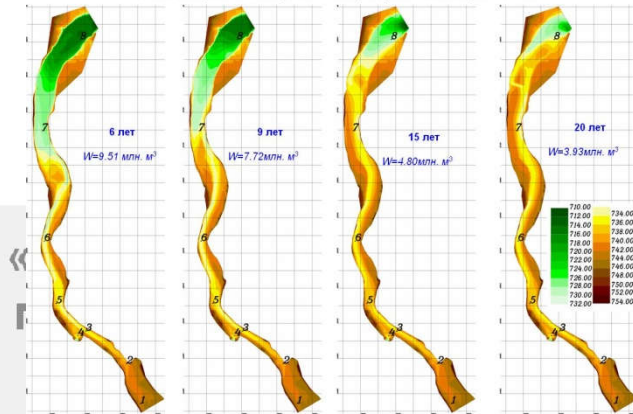


ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ СЕМЕЙСТВА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ STREAM

Позволяет рассчитывать и прогнозировать динамику полей гидравлических характеристик руслового потока (глубина, скорость, уклон) в реках с деформируемым дном, описывать русловые процессы, заиление водохранилищ, донную и береговую эрозию



Заиление (1 год) с периодическими промывками (3.5сут) водохранилища
 $Q=170 \text{ м}^3/\text{с}$, $УВ=740.5\text{м}$, $D50=01\text{мм}$; $Q_{\text{пром}}=350\text{м}^3/\text{с}$, $УВ=730\text{м}$



ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ИВП РАН ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РИСКОМ НАВОДНЕНИЙ

«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ НАВОДНЕНИЙ

Мероприятия по управлению риском наводнений

Структурные (инженерные) мероприятия

Водохозяйственное проектирование, гидротехническое строительство, включая создание водохранилищ, сооружение защитных дамб, изменение морфометрии русла и т.п.



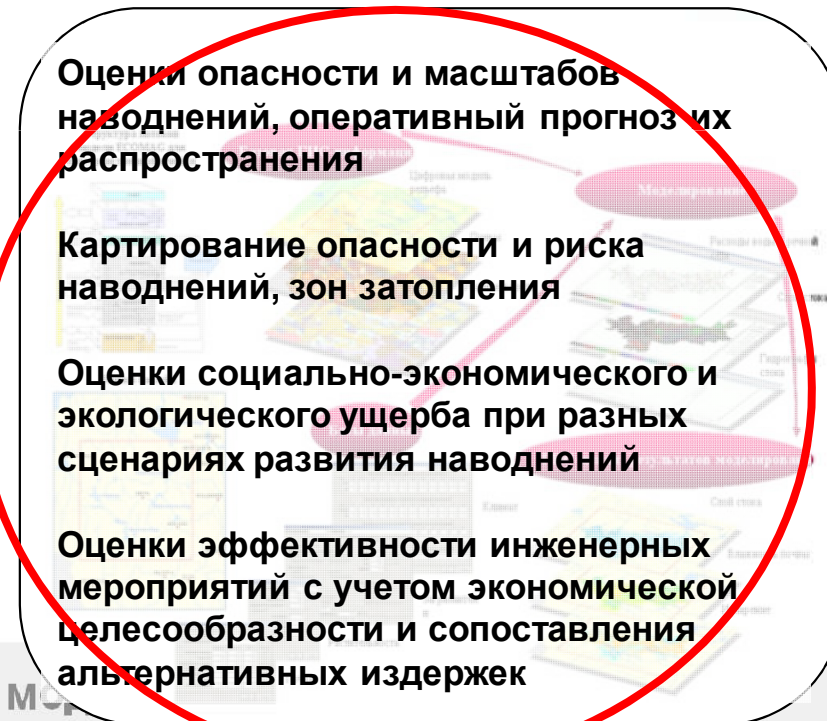
Неструктурные мероприятия

Оценки опасности и масштабов наводнений, оперативный прогноз их распространения

Картирование опасности и риска наводнений, зон затопления

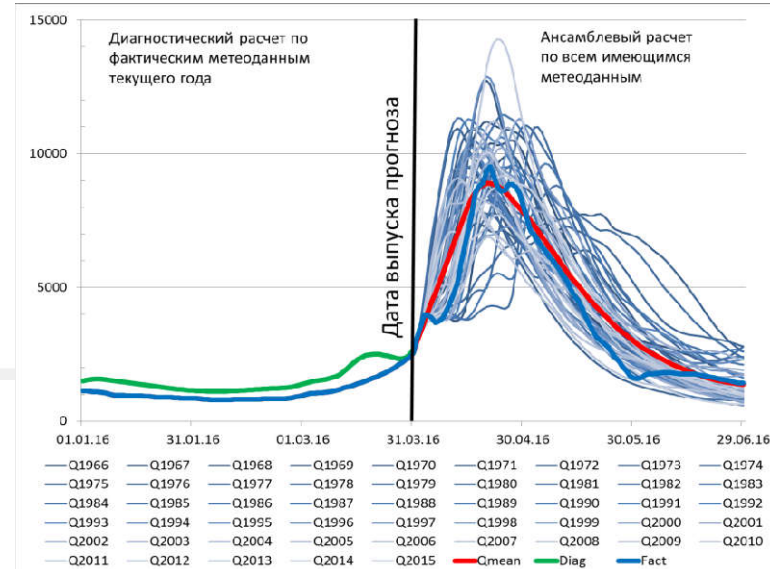
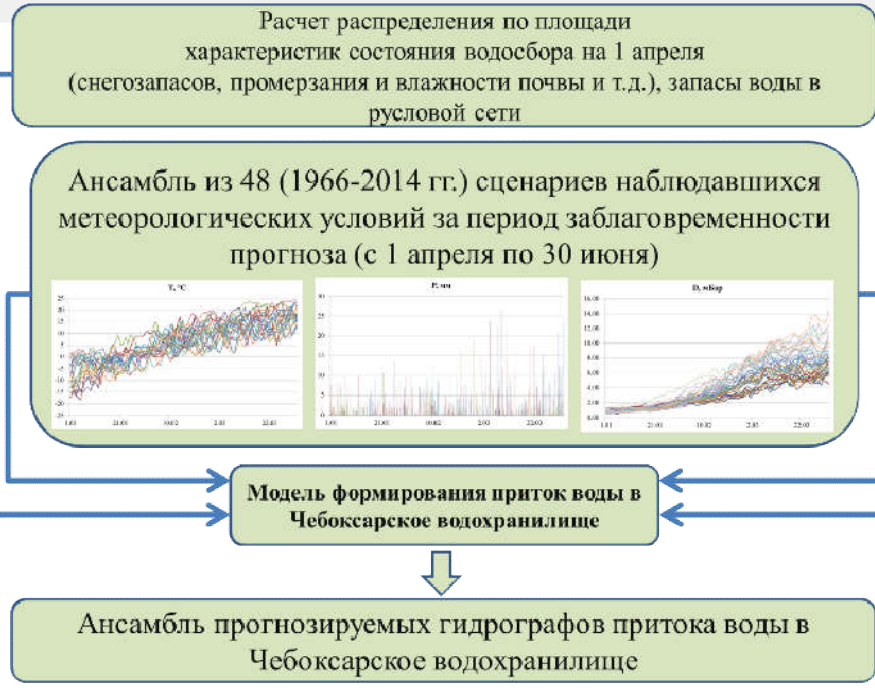
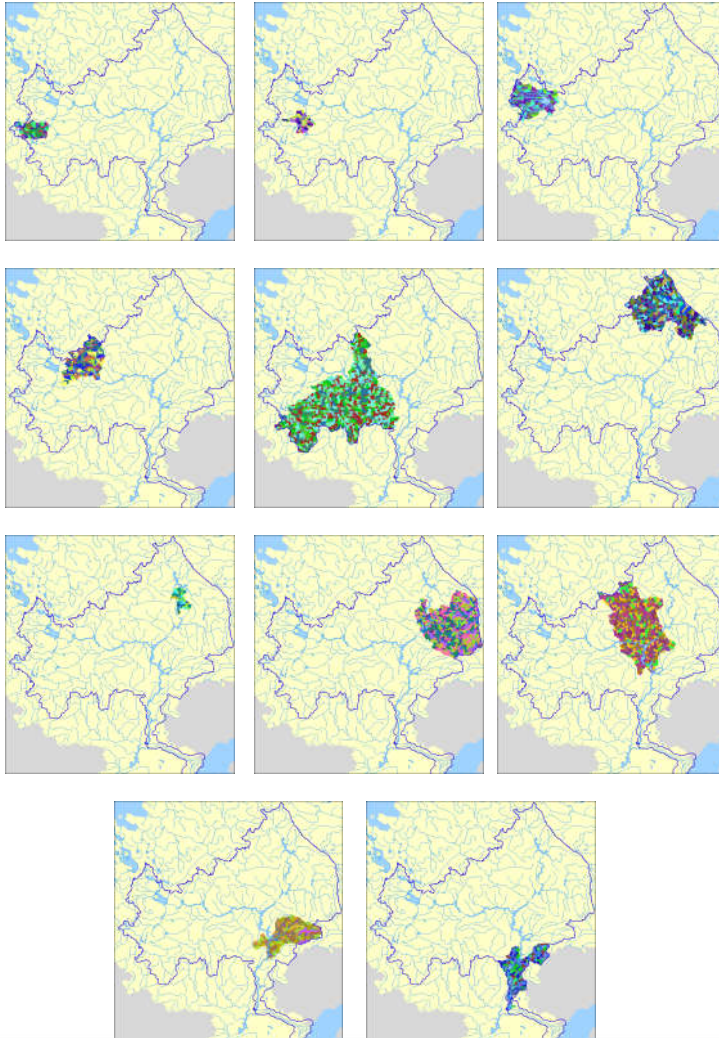
Оценки социально-экономического и экологического ущерба при разных сценариях развития наводнений

Оценки эффективности инженерных мероприятий с учетом экономической целесообразности и сопоставления альтернативных издержек

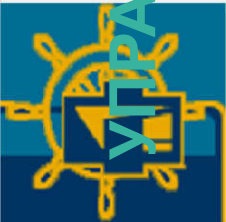


ДОЛГОСРОЧНЫЙ (1-4 МЕСЯЦА) АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ ПРИТОКА ВОДЫ К ВОДОХРАНИЛИЩАМ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА

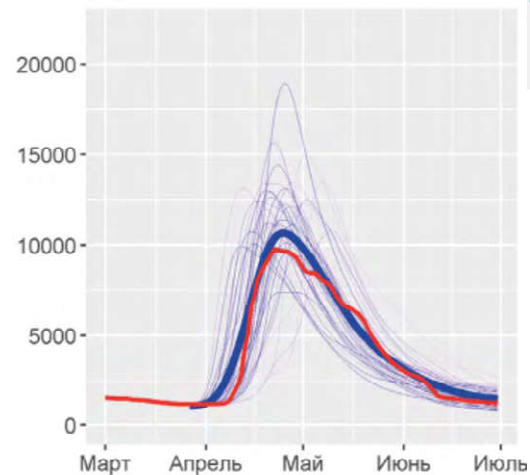
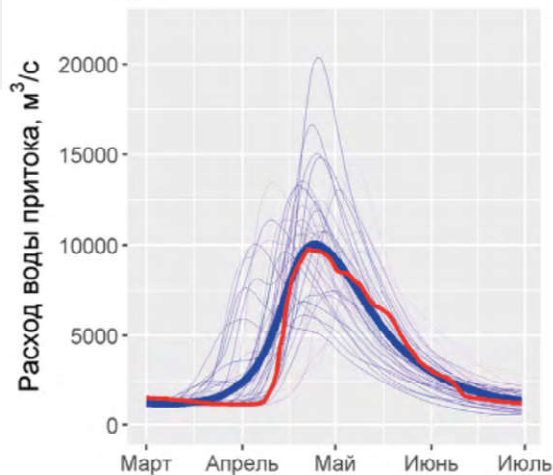
УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ НАВОДНЕНИЙ



Gelfan, A. et al. (2018) Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 2073-89



ОПЕРАТИВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ГМЦ РОССИИ



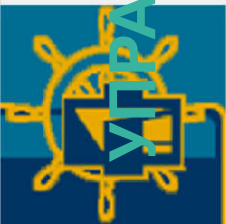
Ансамблевый прогноз притока воды к Чебоксарскому водохранилищу при разных датах выпуска прогноза: слева – прогноз на период 1 марта – 30 июня 2018 г., справа – на период 27 марта – 30 июня 2018 г.. Красная линия - фактический гидрограф, тонкие синие линии – ансамбль прогнозируемых гидрографов, жирная синяя линия – средний по ансамблю гидрограф

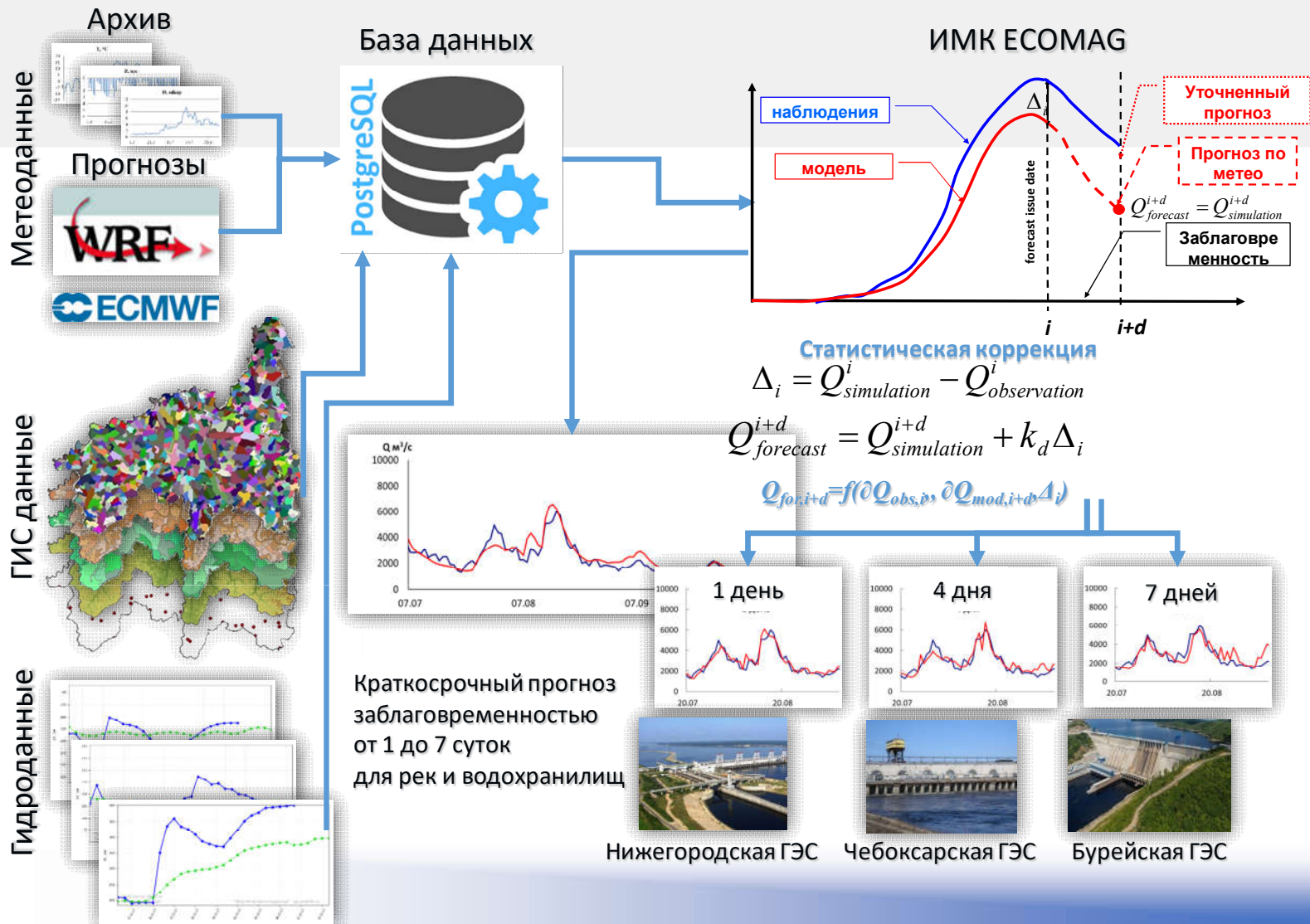
Сведения о фактическом и спрогнозированном притоке воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал 2018 года

Дата выпуска прогноза	Наиболее вероятное значение ожидаемого притока воды за второй квартал, км ³	Фактический приток воды за второй квартал, км ³	Абсолютная ошибка прогноза, в км ³	Ошибка прогноза в % от фактического притока
1.03.2018	38.4	36.1	2.2	6 %
15.03.2018	38.7	36.1	2.5	7 %
27.03.2018	38.2	36.1	2.1	6 %
10.04.2018	35.8	36.1	-0.3	-1 %
16.04.2018	34.1	36.1	-2.0	-6 %

Фактический приток Прогноз от 01 марта 2019 года

Норма	Фактический приток	Прогноз от 01 марта 2019 года	Норма
Март	2.83	2.69	3.89
Апрель	7.54	6.37	
15.52			
Май	5.96	8.05	14.30





Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. (2018) Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., Изд. Российской академии наук. 300с. ISBN 978-5-907036-22-2

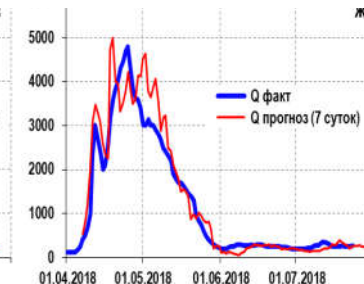
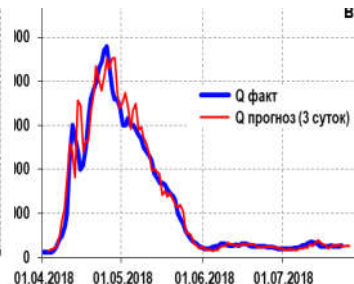
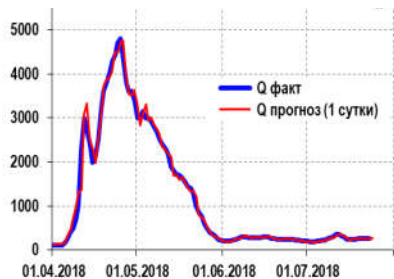
Мотовилов Ю.Г. И др. (2017) Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ECOMAG с использованием метеорологических прогнозов. Водное хозяйство России. №1, 78-102

ОПЕРАТИВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ОАО РусГидро

Управление риском наводнений



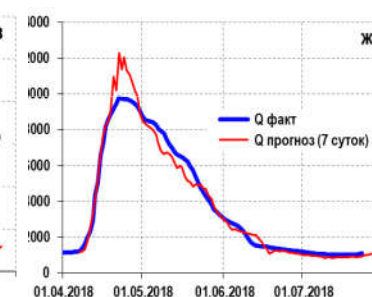
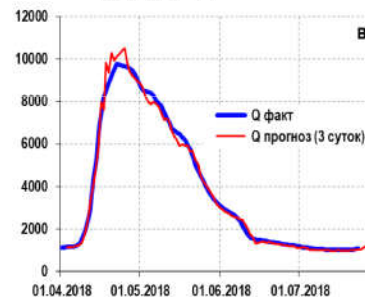
Нижегородская ГЭС



2018 г.



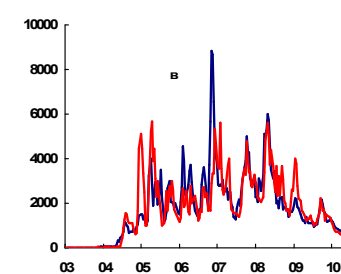
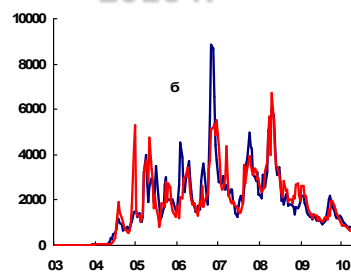
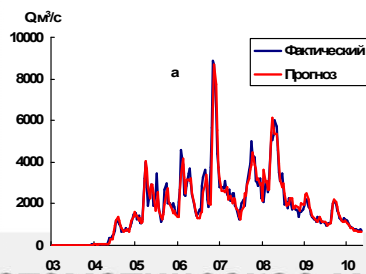
Чебоксарская ГЭС



2016 г.



«Бурейская ГЭС и математическое моделирование



процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП | РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

РАСЧЕТЫ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И УРОВНЯ ВОДЫ В ЗОНАХ ЗАТОПЛЕНИЯ

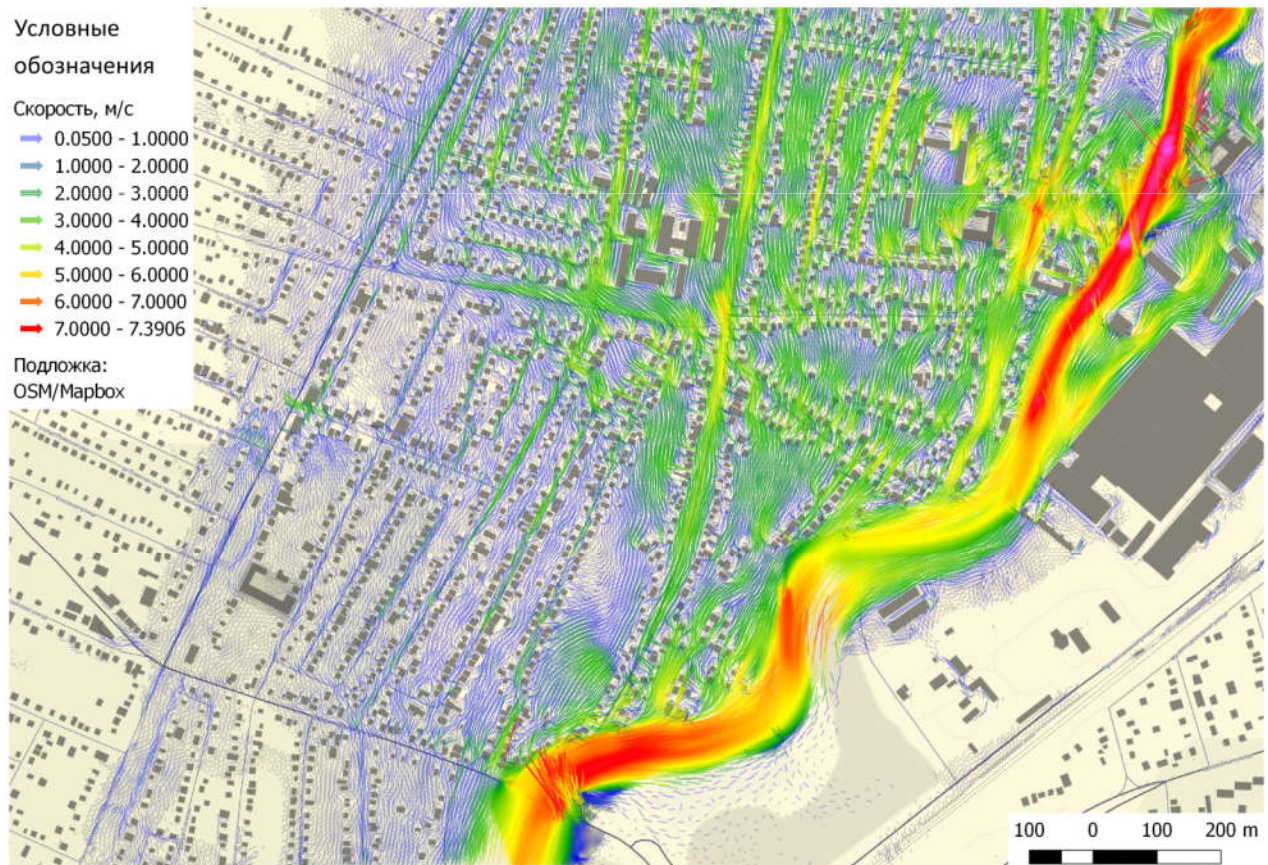
Моделирование наводнения в Крымске летом 2012 года

Управление риском наводнений

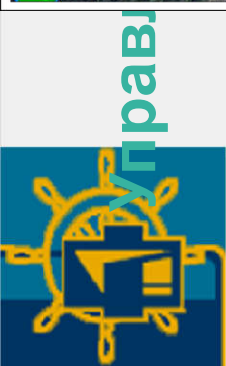
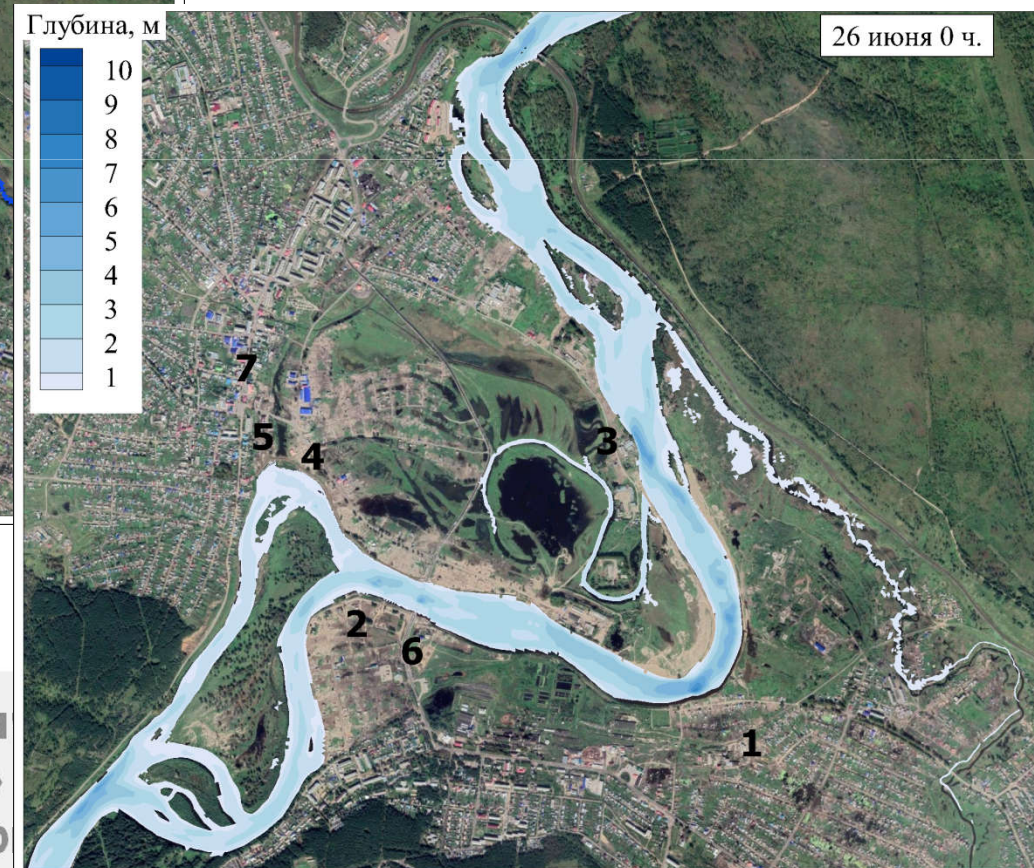
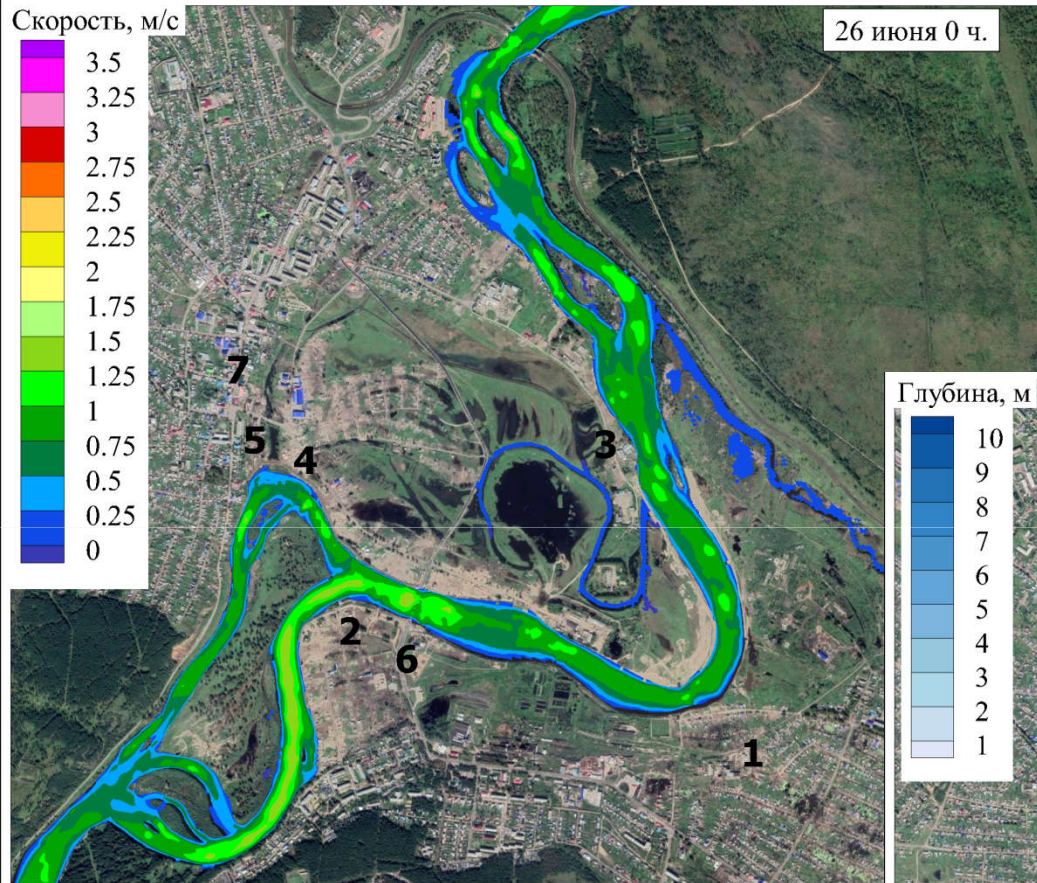
Прямое выделение препятствий на расчётной сетке

Заметные отличия в непосредственной близости от препятствий:

1. С верхней по течению стороны уровни выше, с нижней ниже
2. Скорости течения между рядом стоящими препятствиями заметно выше средних по области



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И УРОВНЯ ВОДЫ В ЗОНАХ ЗАТОПЛЕНИЯ Г. ТУЛУН (КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ПАВОДОК ЛЕТА 2019 ГОДА)



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах»
и вод суши ф

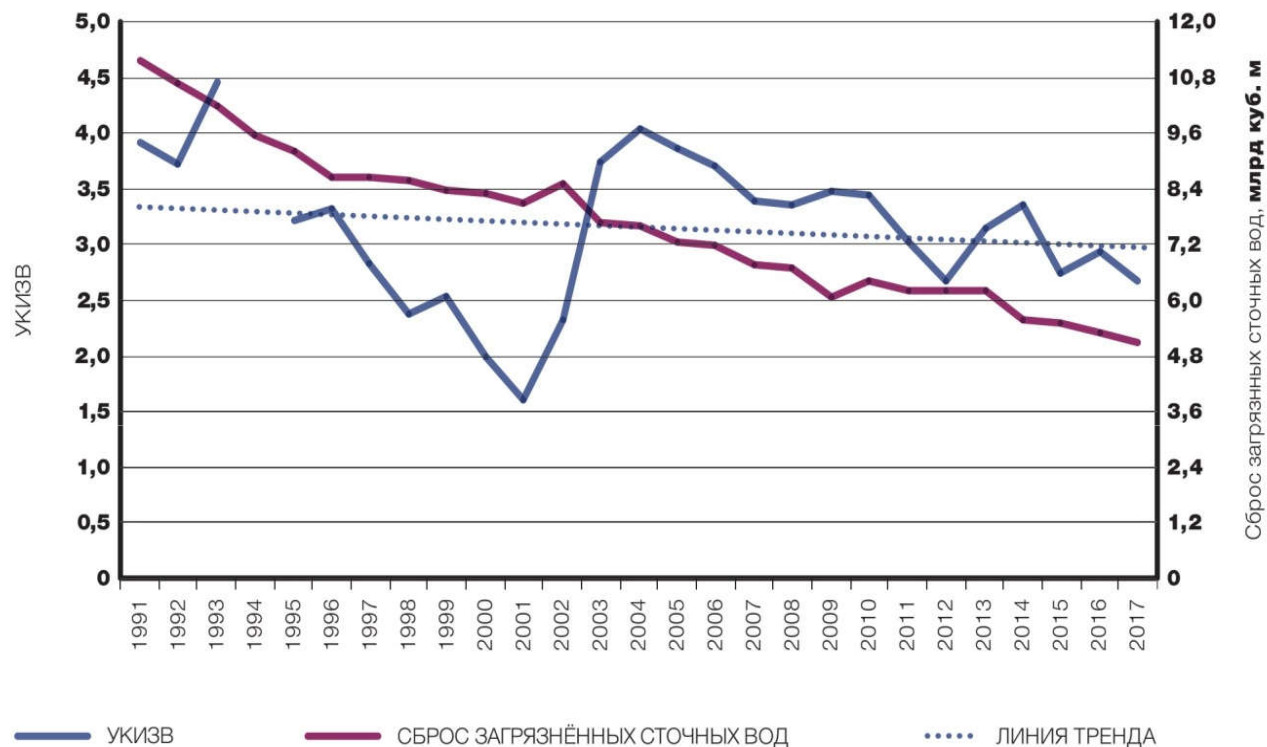
Информационная поддержка управления риском диффузного загрязнения водных объектов



«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года

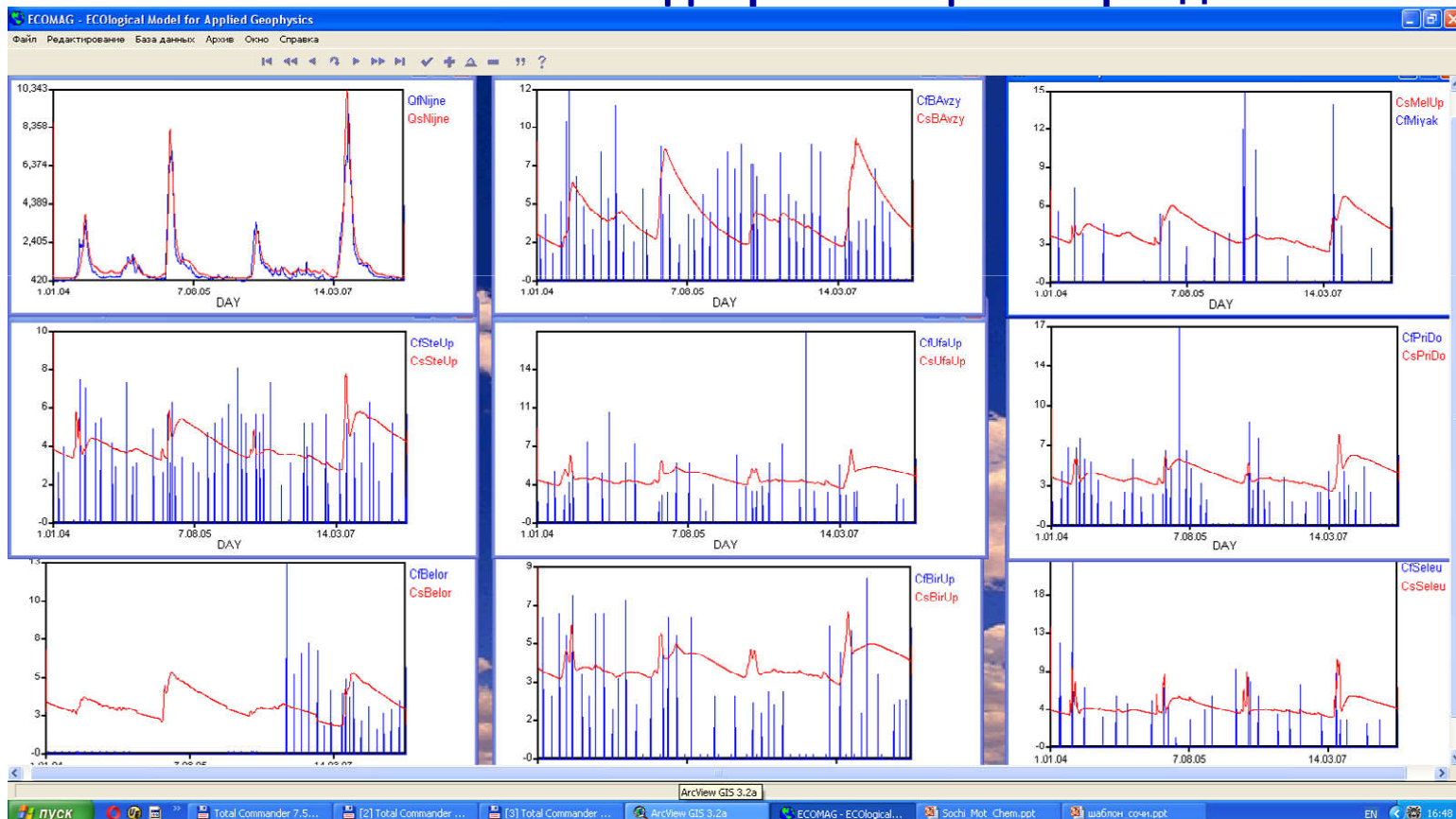
СБРОСЫ СТОЧНЫХ ВОД СНИЖАЮТСЯ, А КАЧЕСТВО ВОДЫ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ НЕ УЛУДШАЕТСЯ



Интегральный показатель загрязненности воды на фоне снижения сброса загрязненных сточных вод в бассейне Волги за период 1991-2017гг. (И.П. Блоков «Окружающая среда и ее охрана в России. Изменения за 25 лет», Москва, 2018)

ОЦЕНКА РИСКА ДИФFUЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ (ЕСОМАГ-НМ)

Фактический и модельный гидрографы стока и концентрации меди (мкг/л) в различных створах водных объектов в бассейне Нижнекамского водохранилища за период 2004-2007 г.



процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ

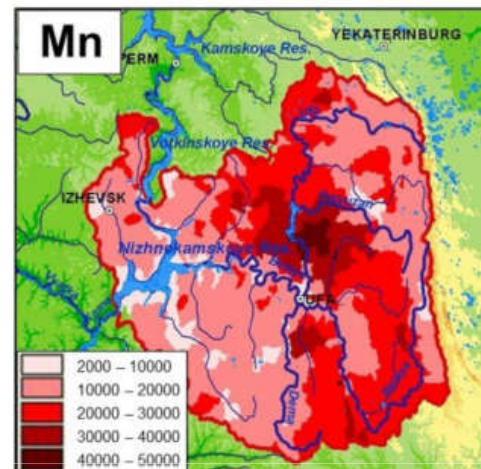
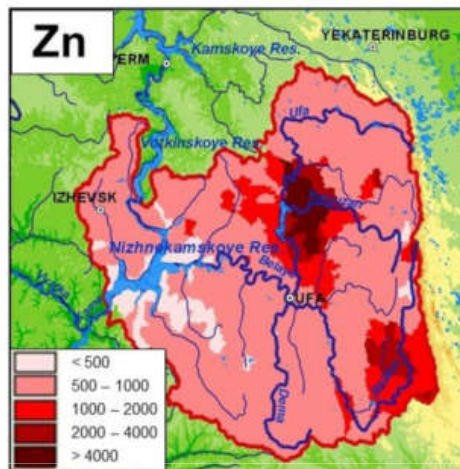
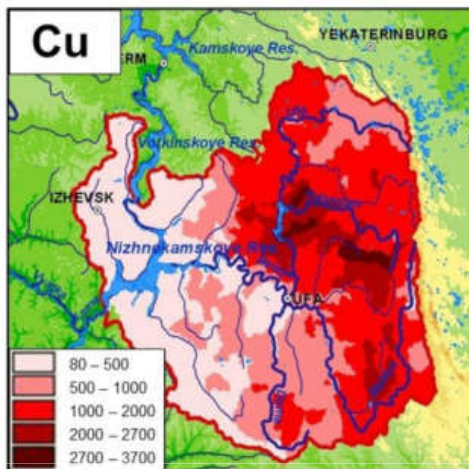
ИВТ РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

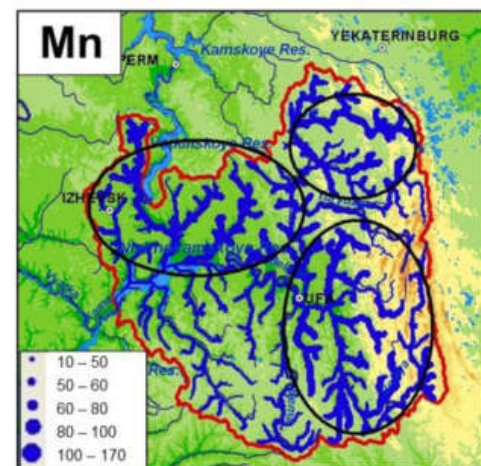
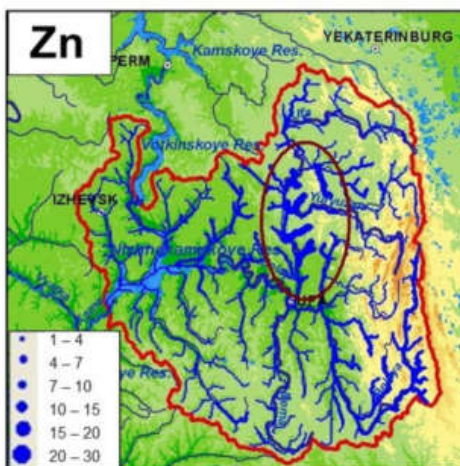
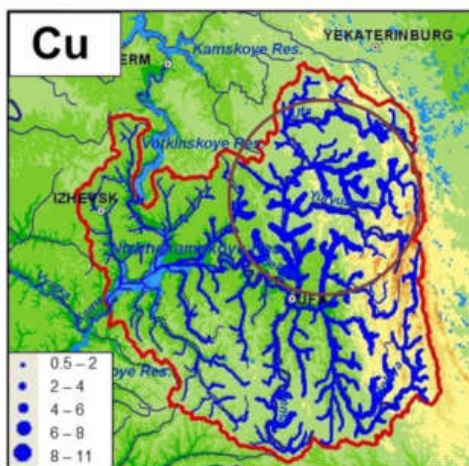
с 1967 года

ОЦЕНКА РИСКА ДИФFUЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Long-term mean annual HM washoff ($\text{g year}^{-1} \text{km}^{-2}$)



Long-term mean annual HM concentrations in the river network ($\mu\text{g L}^{-1}$)



процессов в геосредах» кафедры физики моря и вод суши физфака МГУ

Использование ИМК ИВП в задачах гидрологического мониторинга

«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ

СОКРАЩЕНИЕ СЕТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РОСГИДРОМЕТА

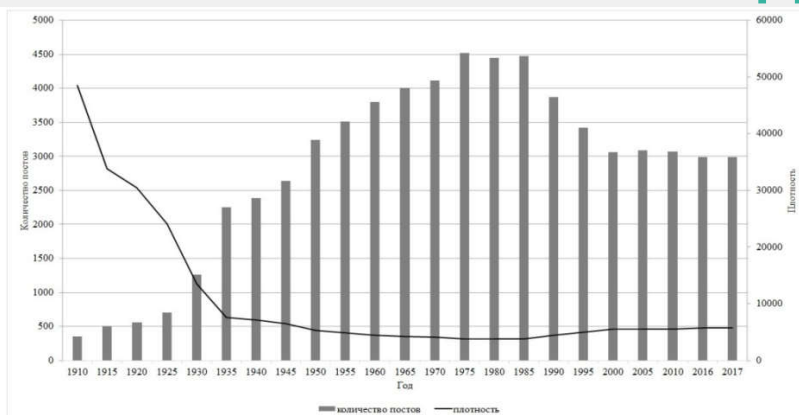


Рис. 1. Динамика численности гидрологической сети РФ за период 1910 - 2017 годы

Количество гидрологических постов в России сократилось по сравнению с 1975 годом на треть, в Сибири и на Дальнем Востоке – почти в 2 раза (Кучеренко и др., 2019)



Рис. Расположение снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги по состоянию на 1989 и 2017 годы.

Сокращение количества снегомерных маршрутов на Верхней Волге – на 40% по сравнению с 1989 годом (Борщ и др., 2018)

Уменьшение плотности наблюдательной сети (среднее расстояние между пунктами наблюдений намного больше характерных пространственных масштабов гидрологических процессов)

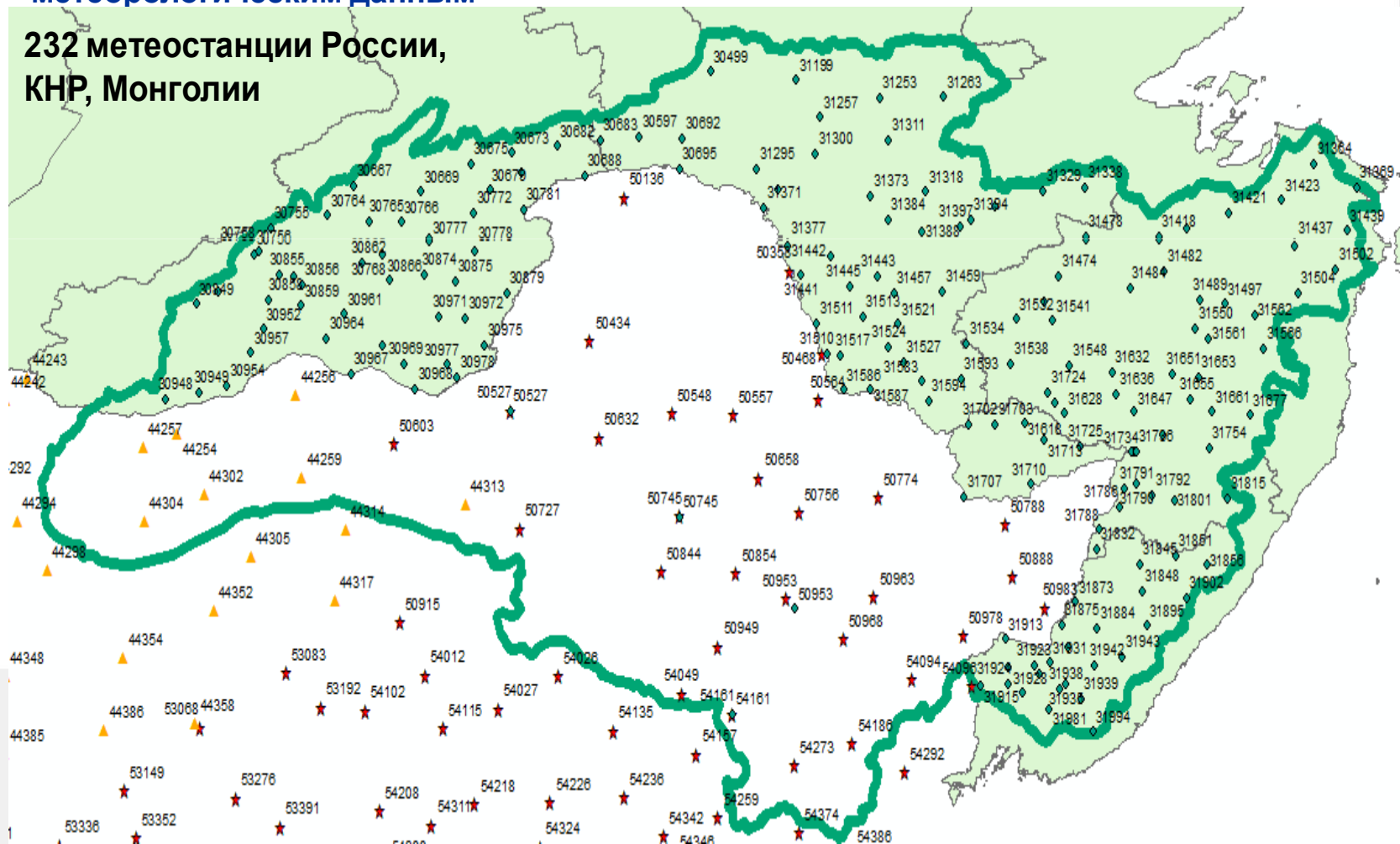
Наблюдения за некоторыми гидрологическими переменными отсутствуют для подавляющего большинства речных бассейнов (измерения расходов воды, испарения с поверхности водосбора, влажности почвы, грунтового стока...)



ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ – ИСТОЧНИК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ИМК ЕСОМАГ)

Позволяет рассчитывать и прогнозировать динамику пространственных полей гидрологических переменных (речной сток, характеристики снежного покрова, испарение, влажность почвы, уровень грунтовых вод...) с высоким пространственным (до первых км) и временным (1 сутки и меньше) разрешением по данным стандартных метеонаблюдений Росгидромета и/или по рассчитанным метеорологическим данным

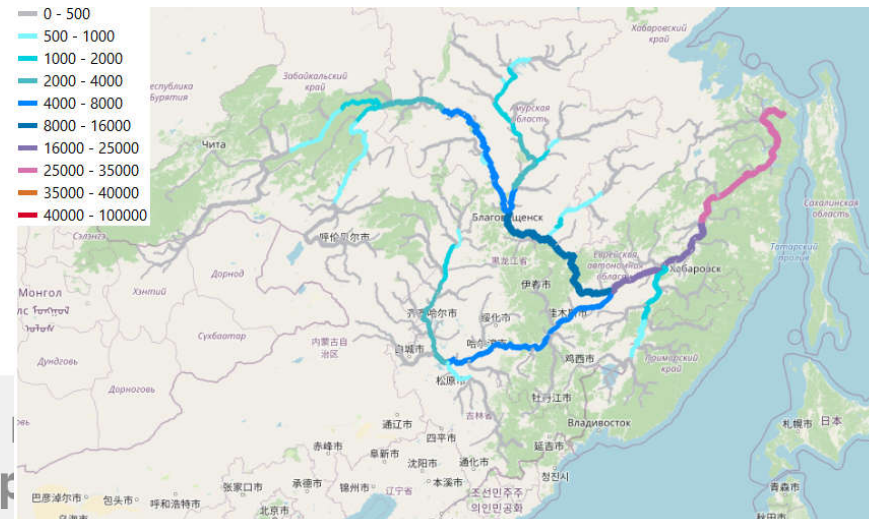
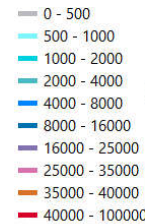
**232 метеостанции России,
КНР, Монголии**



ДИНАМИКА ПОЛЕЙ РАССЧИТАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СНЕГОЗАПАСА, ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ И РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ АМУРА

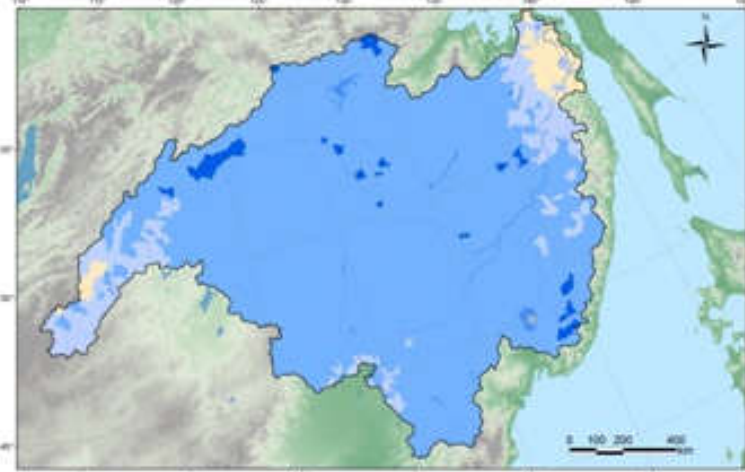


Распределение запаса воды в снежном покрове осенью-зимой 2012-2013 гг.



«Физическое и математическое процессы в геосредах» Кафедра и вод суши физфа

01.08.2013



Распределение влажности почвы перед наводнением 2013 года (с 1.09.2012 до 1.08.2013)

Распределение расхода воды по речной сети



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года



Разделение моделей по соотношению априорной и апостериорной информации в структуре модели и ее параметрах

**Модели типа
«черный ящик»**

Модели, при построении которых априорная информация о структуре и параметрах гидрологической системы игнорируется, а используются лишь наблюдения на ее входе и выходе (во многих случаях гидрологическая система рассматривается как "черный ящик"); такой подход широко применяется в технической кибернетике и обычно называется идентификацией динамической системы;

**Концептуальные
модели стока**

Создаются в условиях, когда физические представления о гидрологической системе неопределенны или неполны, однако имеется ряд априорных зависимостей или гипотетических связей, которые могут быть применены при определении структуры модели или ее параметров

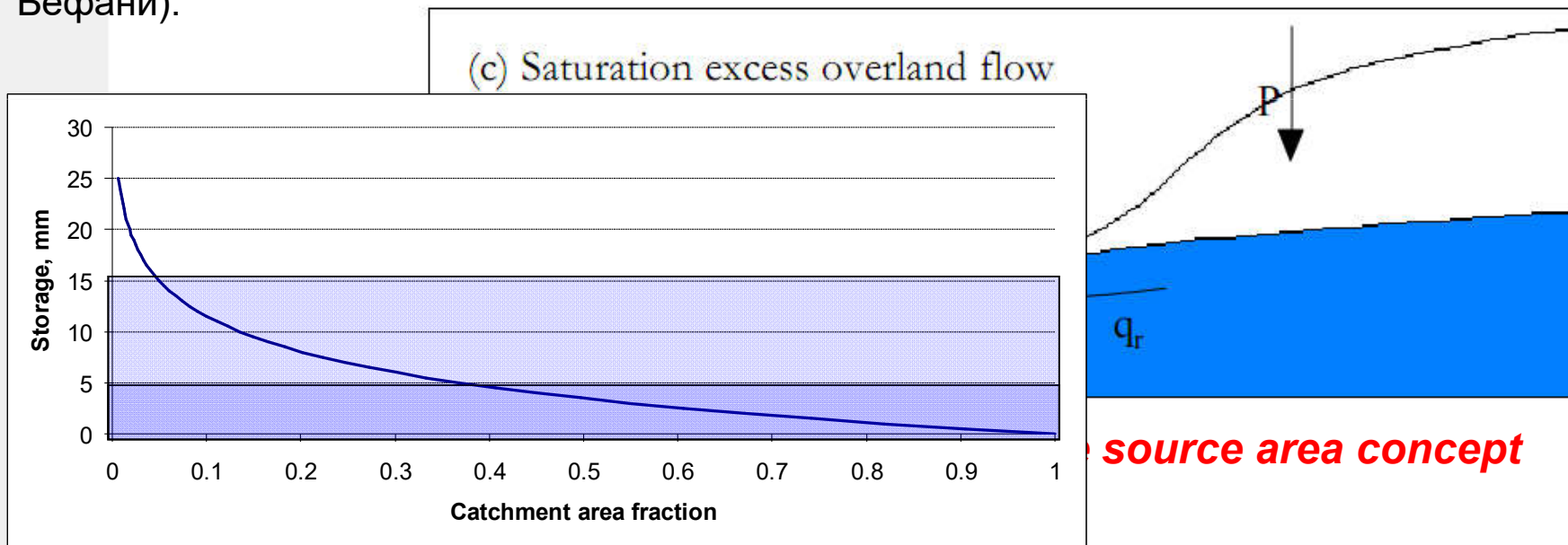
**Физико-
математические
модели
формирования
стока**

Основаны на достаточно полных физических представлениях, параметры могут быть выражены через измеряемые или заданные априорно физические константы

1970-1980-е годы

Развитие концептуальных моделей формирования речного стока.

Другой подход к учету в модели информации о пространственном распределении процессов формирования речного стока основан на предположении о том, что формирование стока на речном водосборе полностью определяется динамикой действующей площади, которая располагается на насыщенных влагой участках водосбора (преобладает механизм «подпертого» стока – по терминологии А. Н. Бефани).

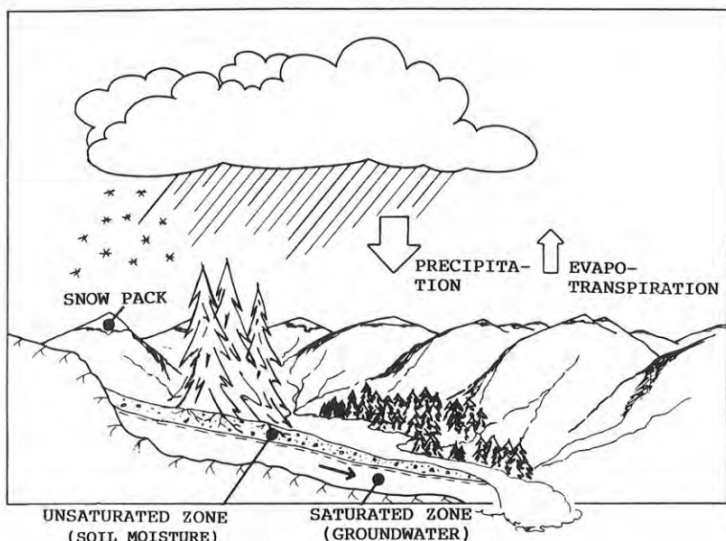


«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

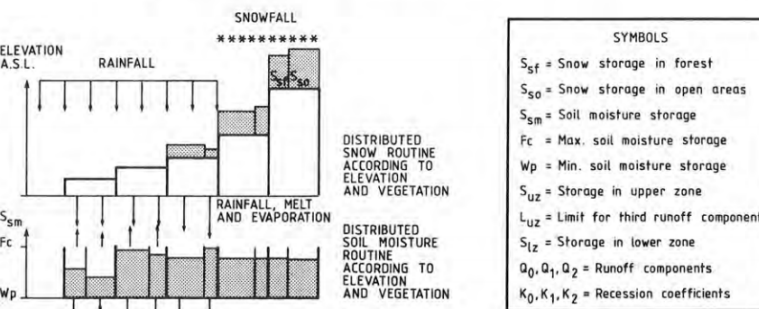
1970-1980-е годы

Развитие концептуальных моделей формирования речного стока.

Другой, начавший развиваться в этот период и впоследствии ставший еще более распространенным подход к учету пространственного распределения характеристик бассейна, – разработка полураспределенных моделей стока (“semi-distributed models” в англоязычной литературе).



Одной из первых моделей такого класса стала концептуальная модель HBV, разработанная С. Бергстромом (**Bergström, 1976**) и распространенная в те годы в скандинавских странах, а сейчас широко применяемая для решения исследовательских и инженерных задач во всем мире. Процессы накопления и таяния снега, поступления дождевых и талых вод на поверхность бассейна, инфильтрации и пополнения подземных емкостей описывались в модели HBV с помощью распределенных по пространству подмоделей, а бассейновая трансформация стока – подмоделью с сосредоточенными параметрами.



Схожий по исходной концепции подход был применен в первой отечественной полураспределенной модели – модели Гидрометцентра СССР (**Бельчиков, Корень, 1979; Корень, 1991**), но для описания основных процессов формирования речного стока в этой модели применены уравнения с физически обоснованными параметрами, что отличает ее от большинства чисто концептуальных моделей того времени



**«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ**

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года



**«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ**

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года



**«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ**

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года



**«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ**

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА КАСКАДАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ



Схема принятия решений при управлении Волжско-Камским каскадом водохранилищ

Реальное на регулярной основе использование имитационных моделей функционирования каскадов крупнейших водохранилищ страны (в первую очередь – Волжско-Камского каскада) для решения комплексных задач непосредственного управления началось в первой половине 1990-х годов.

С 2018 года ИВП РАН выполняет, на основе ГИМК ИВП РАН, информационное сопровождение принятия решений по управлению режимами работы Волжско-Камского каскада водохранилищ.


«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря
Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., 2016, Изд. Российской академии наук. 300с. ISBN 978-5-907036-22-2

ИВП РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА КАСКАДАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ



**«Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах» Кафедра физики моря
и вод суши физфака МГУ**

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года