

О некоторых общих вопросах моделирования в гидрологии речных бассейнов

Гельфан Александр Наумович

*доктор физико-математических наук
член-корреспондент Российской академии наук
директор Института водных проблем
Российской академии наук*

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

Содержание

Гидрология суши как геофизическая наука

Особенности гидрологической системы речного бассейна как физического объекта

Развитие представлений о процессах формирования речного стока

Основные типы математических моделей, применяемых в гидрологии речных бассейнов: краткий исторический экскурс

Развитие методов математического моделирования в гидрологии речных бассейнов в сравнении со смежными геофизическими дисциплинами: аналогии и расхождения (на примере метеорологии)

«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



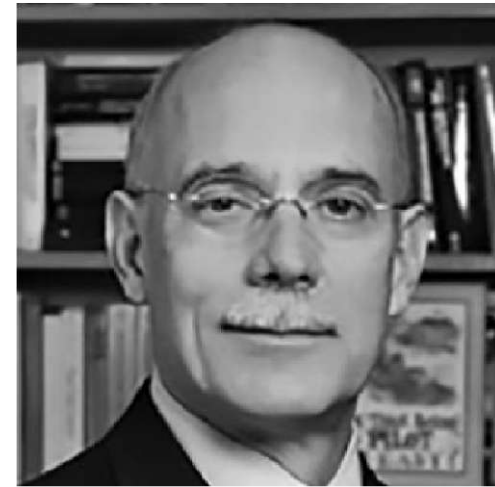
Гидрология как геофизическая наука



В 1937 году, в предисловии к 3-му изданию учебника «Гидрология суши», один из основоположников отечественной гидрологии Михаил Андреевич Великанов сформулировал «взгляд на гидрологию, как на основу геофизики» и определил предмет гидрологии, как «физика гидросферы» (Великанов, 1937; стр. 3, 8)

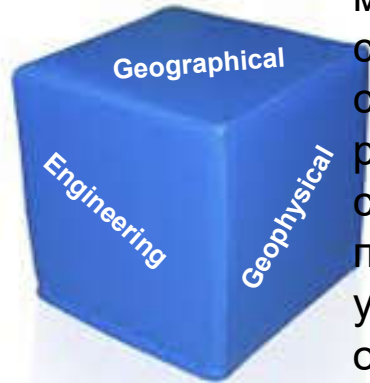


В 1987 году Рафаэль Брас и Питер Иглсон – крупнейшие гидрологи второй половины прошлого века – опубликовали статью под провокационным заголовком «Hydrology, The forgotten Earth science»



For more than a century the development of hydrology has been largely in the hands of civil and agricultural engineers working on the classic problems of water supply and the reduction of natural hazards. Their considerable success at these tasks is evidenced by the high standards of public health and safety enjoyed by the urban populations of the developed nations. Nevertheless, the pragmatic focus of hydrologic engineering has retarded the development of fundamental hydrologic science in comparison with the earth, atmospheric, and ocean sciences. This has resulted in a scientific and educational base that is inadequate for solution of many emerging problems. Where absent, the

Гидрология, как геофизическая наука



За прошедшие 35-40 лет произошли существенные изменения в методологии гидрологических исследований и во взглядах научного сообщества на место гидрологии суши в системе наук о Земле. С одной стороны, эти изменения продиктованы объективной (внутренней) логикой развития гидрологии, как естественной науки, в направлении построения собственной методологии на базовых физико-математических принципах и понятиях, единых для смежных геофизических наук. С другой стороны, указанная тенденция стимулируется субъективными, внешними по отношению к науке факторами, которые связаны с общественным запросом на расширение информационного содержания и увеличение точности гидрологических приложений в условиях растущего влияния человека на природную среду.

«Hydrology: No Longer the Forgotten Science» (Bras, 2009) – «гидрология перестала быть забытой <естественной> наукой» – результат произошедшей смены парадигмы в методологии гидрологических исследований, констатированный одним из авторов упомянутой выше статьи (Bras, Eagleson, 1987) через 22 года после ее опубликования и через 72 года после книги М.А. Великанова.



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

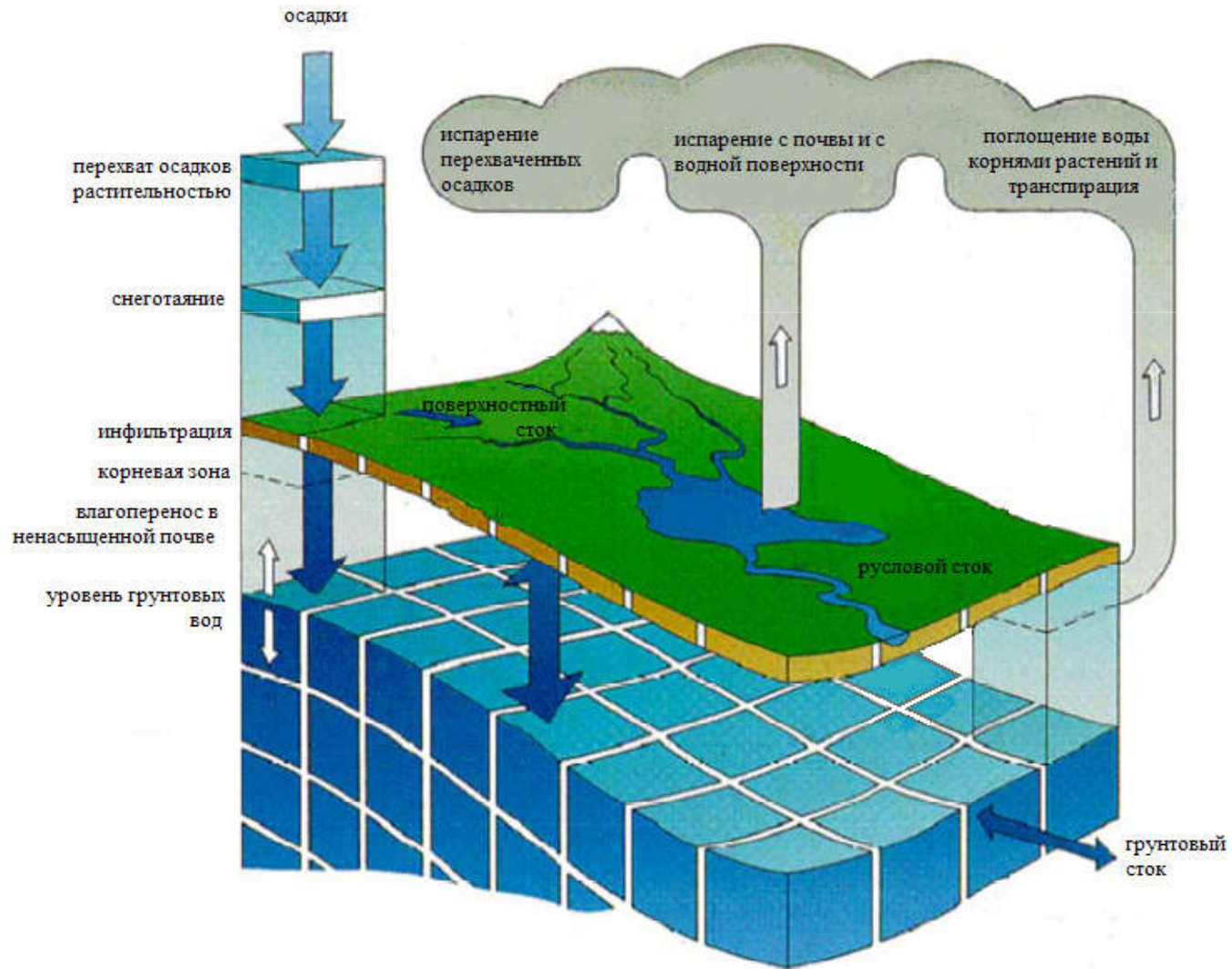
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

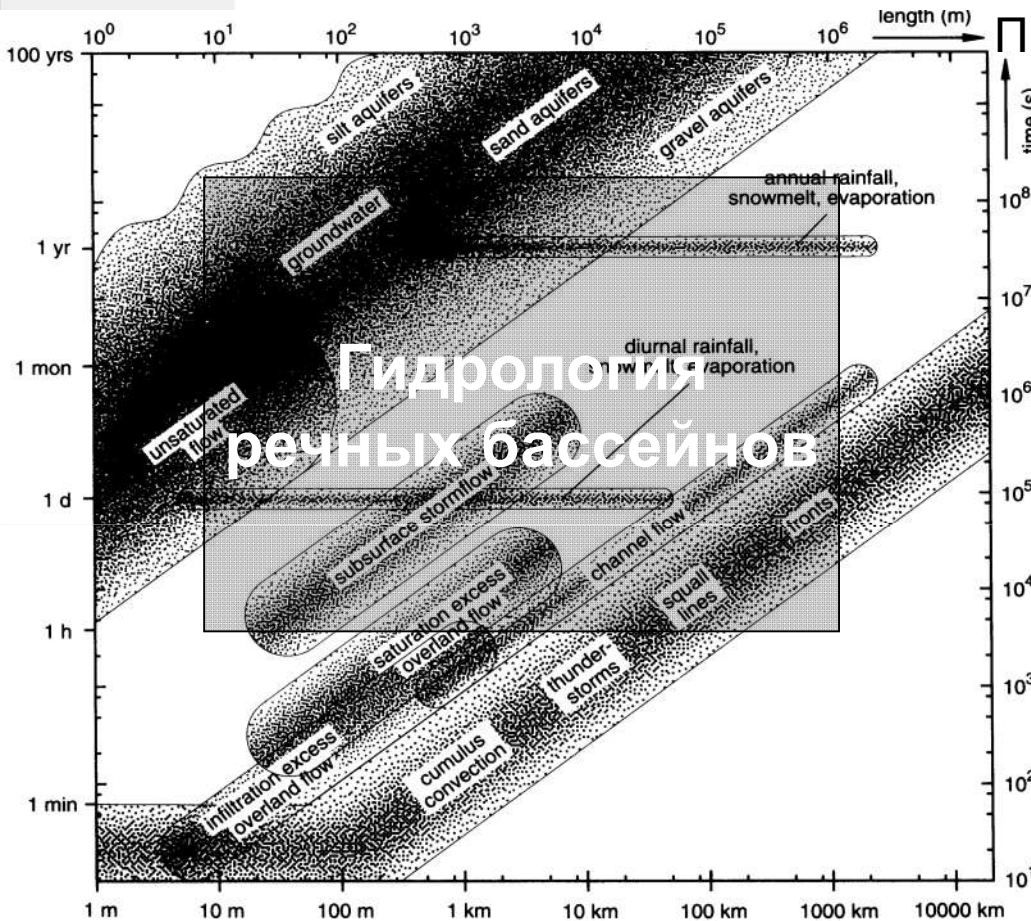
с 1967 года

Гидрология, как геофизическая наука

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



Речной бассейн, как физический объект



Гидрология
речных бассейнов

Пространственные масштабы физических процессов, происходящих в гидрологических системах речных бассейнов, варьируют в диапазоне шести порядков — до миллионов квадратных километров, а характерные скорости горизонтального, например, движения водных масс в отдельных компонентах системы — в пределах шести-семи порядков: от десятков сантиметров в секунду (русловой сток) до метров в год (глубокий подземный сток).

Пространственные и временные масштабы гидрологических процессов (из Blöschl, Sivapalan, 1994)

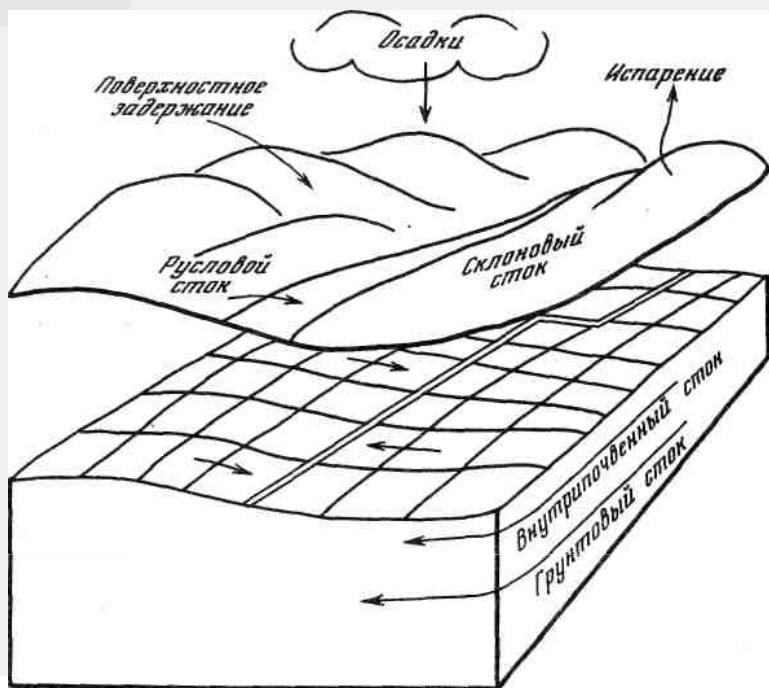


«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

Речной бассейн, как физический объект



Проблемы описания динамических свойств гидрологической системы речного бассейна, физических механизмов отклика системы в целом и ее отдельных элементов на внешние воздействия, особенностей проявления этих механизмов на разных пространственных и временных масштабах, факторов, определяющих их разнообразие в зависимости от физико-географических и климатических условий – далеко не полный перечень геофизических задач, составляющих содержание современной гидрологии речных бассейнов.

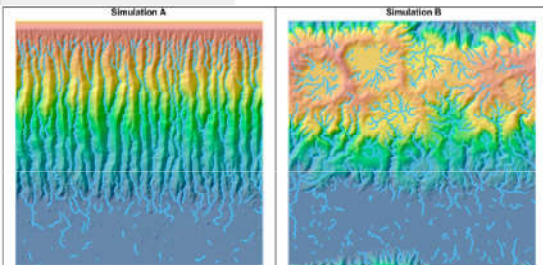
Отличие в их постановке и путях решения по сравнению с традиционными подходами, развитыми в смежных геофизических дисциплинах, во многом связаны со специфическими свойствами гидрологической системы речного бассейна, как физического объекта. При всем многообразии свойств миллионов речных бассейнов Земли, их общие свойства, как физических объектов, можно сформулировать следующим образом

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

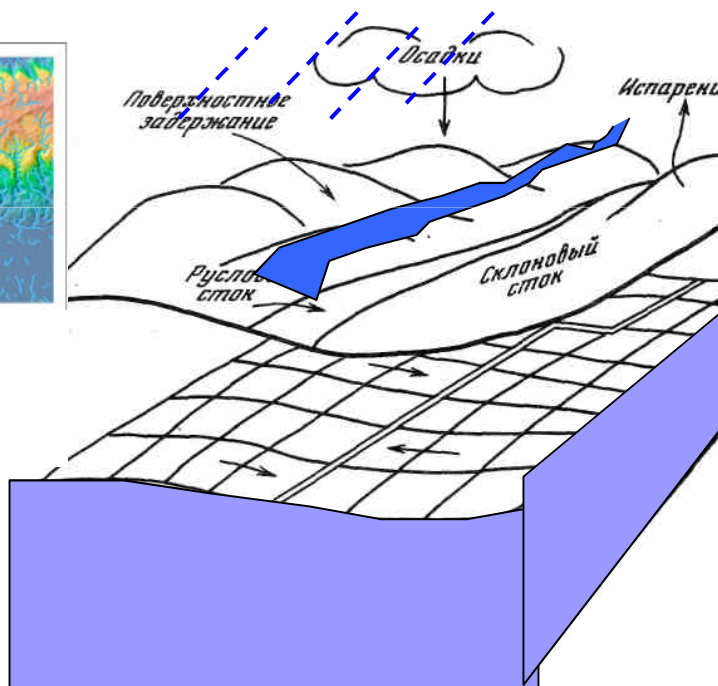
Речной бассейн, как физический объект

1. Речной бассейн – сложная динамическая система.

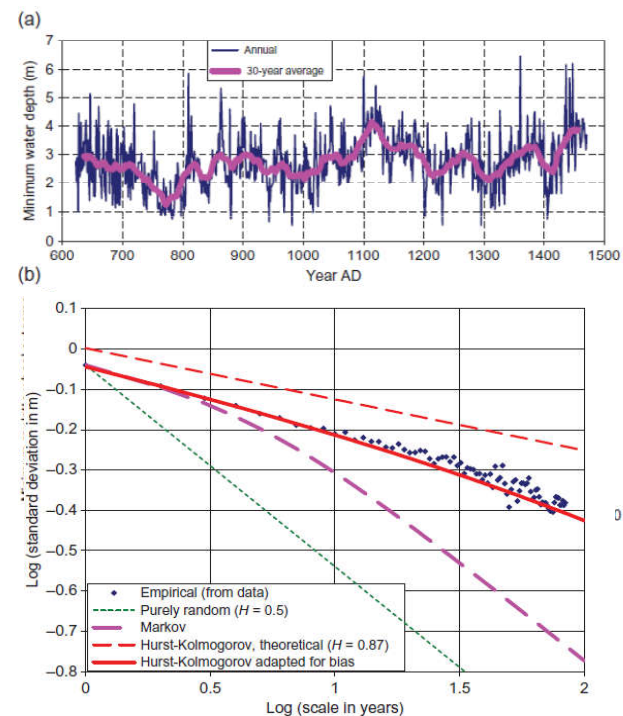
Нелинейная динамика на микромасштабах (напр., flow fingering)



«Пороговая» динамика гидрологических процессов на микро- и мезомасштабах



Нелинейная динамика гидрологических процессов на макромасштабах (Koutsoyiannis et al., 2009)



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

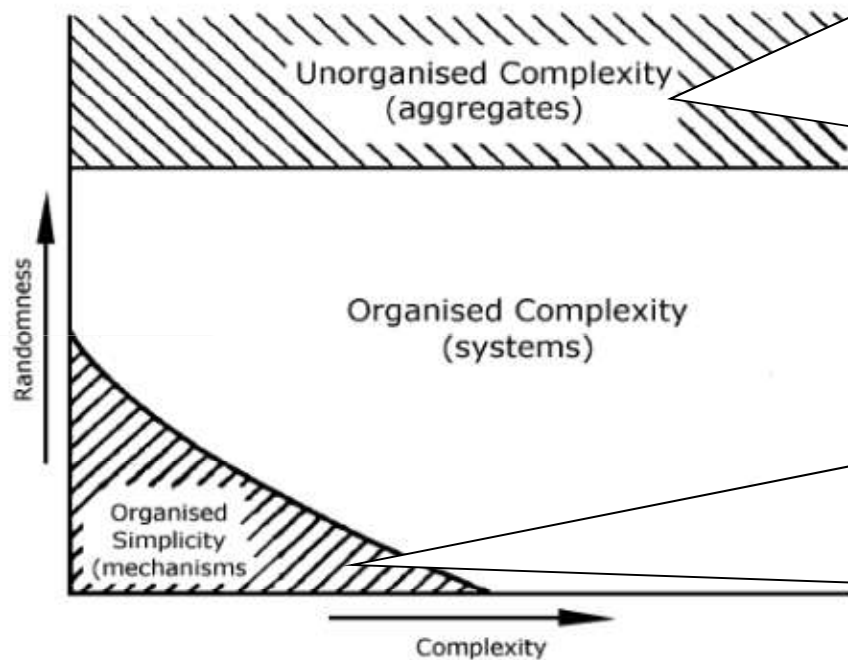
ИВП РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

Речной бассейн, как физический объект

2. Речной бассейн – динамическая стохастическая система



Слабоструктурированные системы с множеством степеней свободы (агрегаты). Вероятностные свойства системы описываются методами статистической физики с учетом неопределенности параметров и/или краевых условий

Высокоорганизованные системы с малым числом степеней свободы (механизмы). Состояние системы описывается классическими методами детерминистической механики на основе точного знания ее параметров, а также начальных и граничных условий

 = Analytical treatment Из (Dooge, 1986)

 = Statistical treatment

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

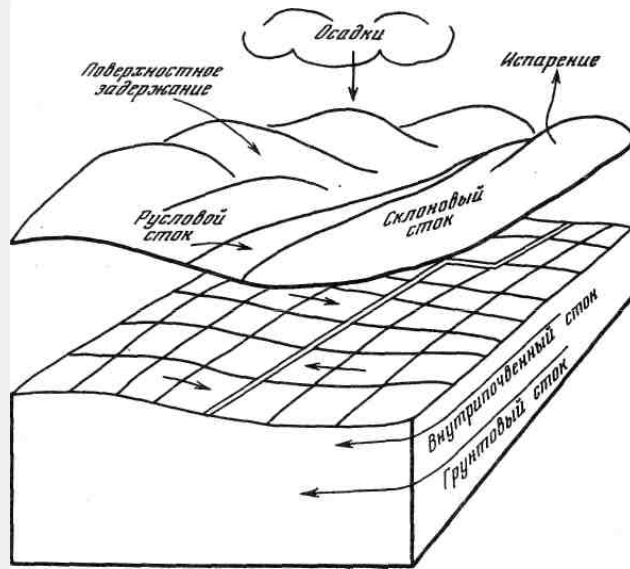
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

Речной бассейн, как физический объект

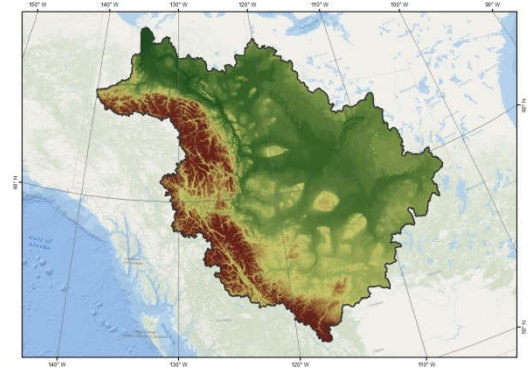
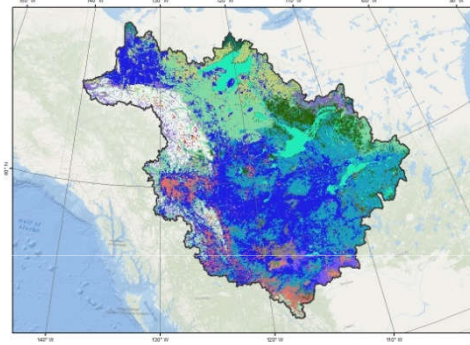
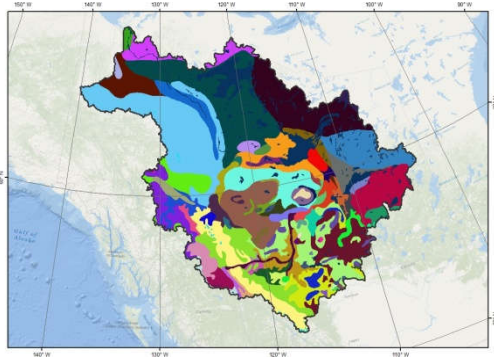
3. Речной бассейн – квазидвумерная система



Элементы гидрологической системы речного бассейна, в которых происходят физически значимые процессы вертикального массо- и энергообмена с атмосферой (растительный покров, почвогрунты) и процессы горизонтального массо- и энергопереноса (русловая сеть, водоносные подземные горизонты), можно рассматривать как тонкие пленки, поскольку характерные вертикальные размеры этих элементов на несколько порядков меньше их горизонтальных размеров.

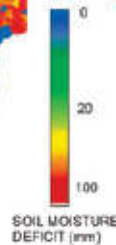
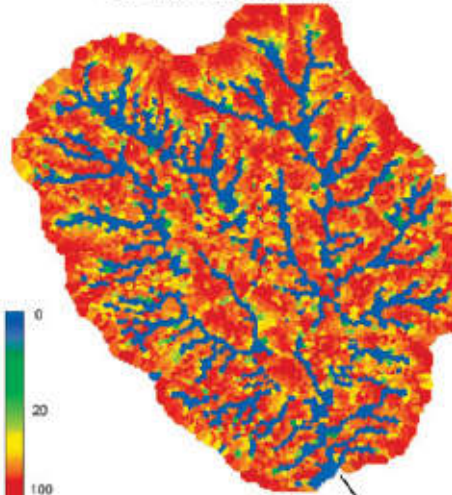
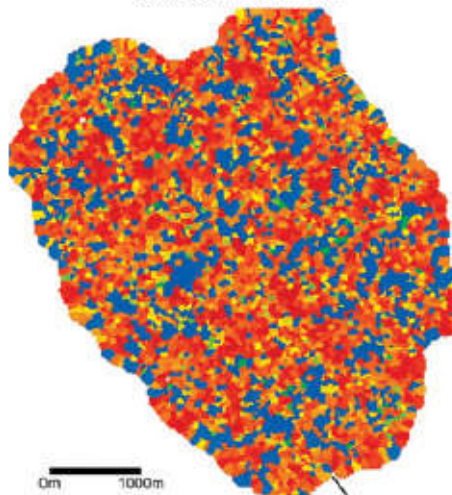
Речной бассейн, как физический объект

4. Речной бассейн – пространственно неоднородная система



RANDOM PATTERN

ORGANISED PATTERN



вание
моря

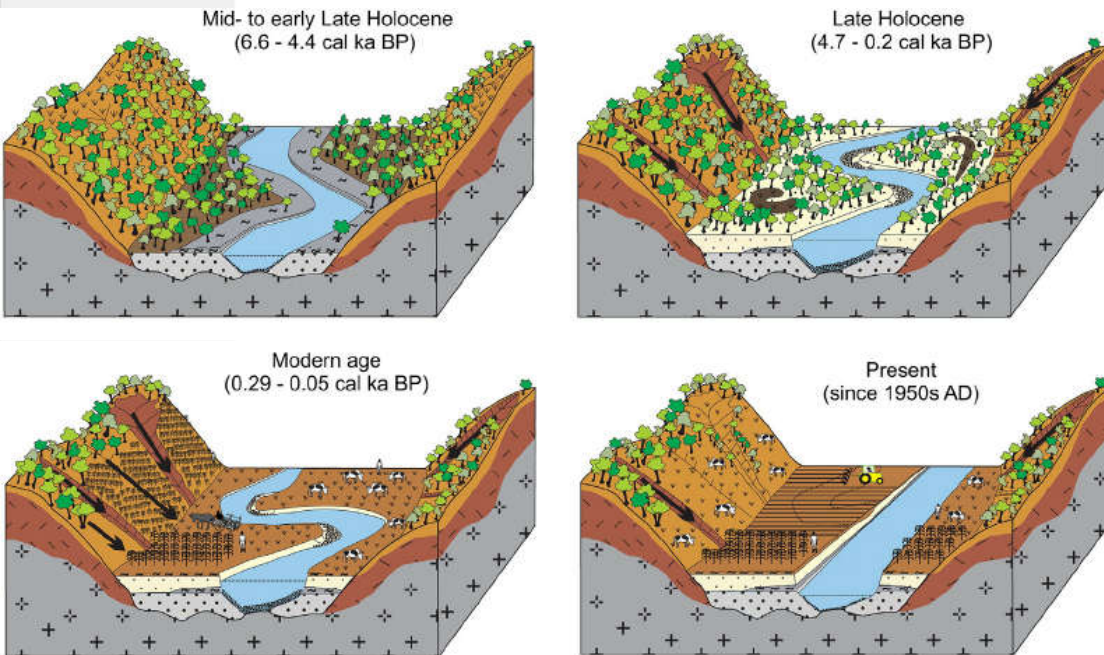
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1957 года

Речной бассейн, как физический объект

5. Речной бассейн – эволюционирующая система с переменными параметрами



Пространственная организация физических свойств бассейна является следствием многолетней взаимосвязанной эволюции эрозионных форм рельефа, почв, ландшафтов, в том числе, под воздействием климатических факторов и биоты, т.е. речной бассейн представляет собой эволюционирующую систему, физические параметры которой изменяются во времени. Помимо природных факторов, параметры речного бассейна могут изменяться вследствие антропогенного воздействия: урбанизация, мелиорация и др., причем скорость этих изменений обычно намного выше скорости природных изменений

«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



Вывод 1:

основным средством исследования гидрологической системы (более точно, изучения ее физических свойств и прогноза ее динамики) является математическое моделирование.



Речной бассейн, как физический объект

Вывод 2:

решение исследовательских и прогностических задач гидрологии речных бассейнов возможно лишь на основе численных физико-математических моделей с распределенными параметрами, которые строятся на базовых физических принципах и понятиях, единых для смежных геофизических дисциплин, и учитывают специфические свойства конкретного речного бассейна.



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

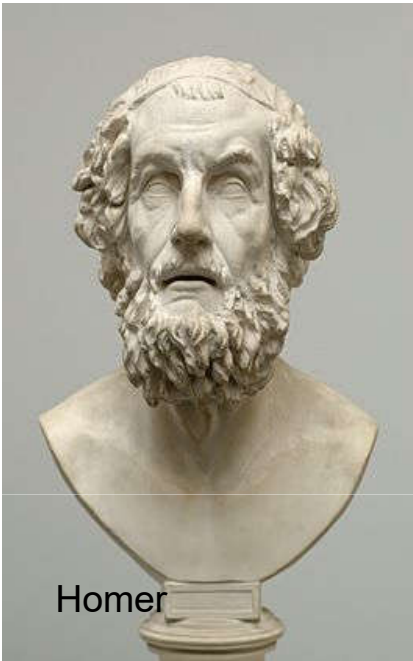
ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
с 1967 года

Развитие методов математического моделирования: краткий экскурс в историю

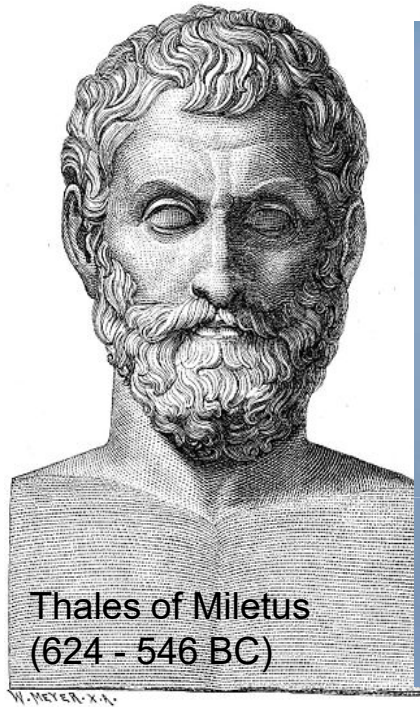
«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

Ancient European civilization

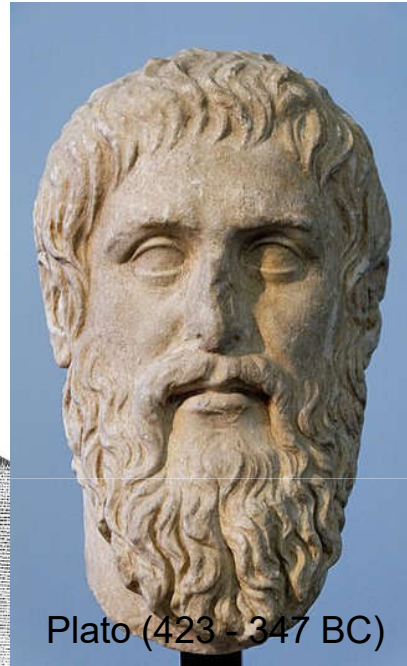
Development of Hydrology: brief historical excursion



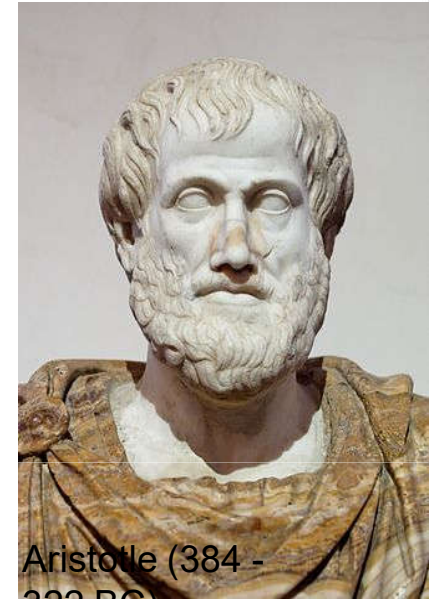
Homer



Thales of Miletus
(624 - 546 BC)



Plato (423 - 347 BC)



Aristotle (384 -
322 BC)

From ancient times many have speculated about the circulation of water...

Much of these speculations were scientifically unsound

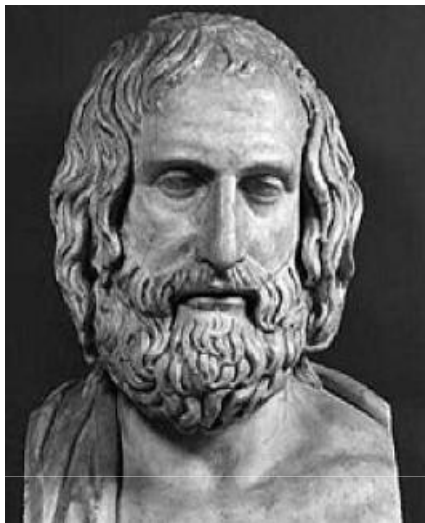
«Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» Кафедра физики моря и вод суши физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

Ancient European civilization



The Greek philosopher Anaxagoras of Clazamenae (500-428 BC) formed the first primitive version of hydrologic cycle.



The improvement of this theory was made by another Greek philosopher, Theophrastus, (372-287 BC) who correctly described the water cycle in the atmosphere

Ancient European civilization



After studying the works of Theophrastus, the Roman architect and engineer Marcus Vitruvius (80(70)-15 BC) conceived the theory that is now generally accepted: he extended Theophrastus's explanation, claiming that groundwater was largely derived from rain and snow through infiltration from the ground surface. This may be considered forerunner of the modern version of hydrologic cycle.

Ancient Asian civilization

¹ In the volume “Minor Folksongs” of the “Book of Odes” (anonymous, 900–500 B.C.) is written: “Rain and snow are interchangeable and becoming sleet through first (fast) condensation.” Also, Fan Li (400 B.C., Chi Ni tzu or “The Book of Master Chi Ni”) said: “...the wind (containing moisture) is ch’i (moving force or energy) in the sky, and the rain is ch’i of the ground. Wind blows according to the time of the year and rain falls due to the wind (by condensation). We can say that the ch’i in the sky moves downwards (by precipitation) while the ch’i of the ground moves upwards (through evaporation).”

² Upanisads, dating from as early as 400 B.C. (Micropaedia, Vol. X, The New Encyclopaedia Britannica, p. 283, 1974), translated from Sanskrit to English by Swami Prabhavananda and Frederick Manchester, Mentor Books, No. MQ921, p. 69. In this work is written: “The rivers in the east flow eastwards, the rivers in the west flow westward, and all enter into the sea. From sea to sea they pass, the clouds lifting them to the sky as vapor and sending them down as rain.”

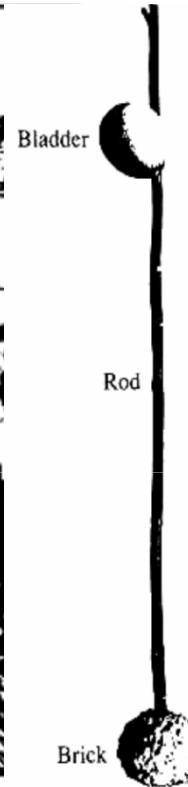
³ Karaji, M., “Extraction of Hidden Water”, ca. 1016 A.D., translated from Arabic to Persian by H. Khadiv-Djam. Iranian Culture Foundation, Tehran, Iran. In this work is written: “Springs come from waters hidden inside the earth while waters on the ground surface from rains and snows ... and rain and snowmelt percolate the earth while only excess waters run off into the sea....”

Renaissance

Development of Hydrology: brief historical excursion



Leonardo da Vinci measured the velocity distribution across a stream section (adopted from Frazier, 1974)



Leonardo da Vinci (1452-1519) made the first systematic studies of velocity distribution in streams using a weighted rod held afloat by an inflated animal bladder. Prior to Leonardo, it was thought that water flowed more rapidly at the bottom of a stream

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

XVI-XVII century: beginning of scientific hydrology

Before the 17th century, many natural philosophers accepted the Greek theory (proposed by people who lived in a semiarid climate on limestone hills) that rainfall was insufficient to feed springs and rivers. It was thought that spring water was purified sea water from deep within the earth.



In 1580, Bernard Palissy proposed the theory of the hydrologic cycle. He showed that rivers originate from rainfall, thus refuting the old-age theory that streams were supplied directly by the sea.



Pierre Perrault (1608–1680) made careful observations of rainfall and streamflow in the Seine River basin, confirming Palissy's hunch and thus began the study of modern scientific hydrology. His numerical estimates demonstrated that the annual river runoff was only one-sixth of the amount of water falling as rain or snow over the drainage basin in a year.

XVIII-XIX century: flowering hydraulics

Hydraulic measurements and experiments flourished during the 18 century. New hydraulic principles were discovered such as the Bernouli equation and Chezy formula and better instruments were developed.

Dalton – principle for evaporation (1802)

The theory of capillary flow (Hagen-Poiseuille equation, 1839)

Darcy principle for porous media flow (1856)

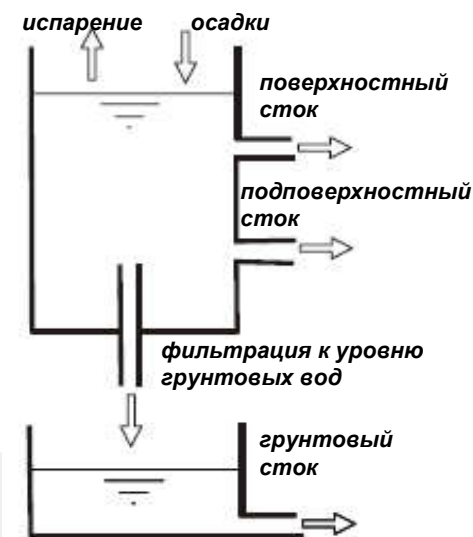
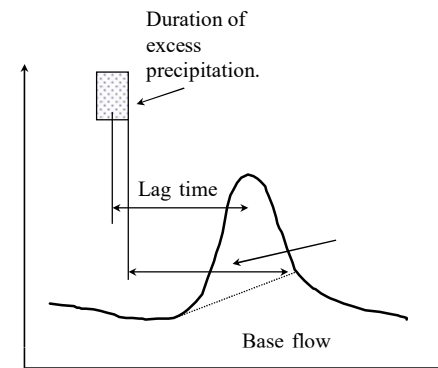
Manning's open-channel flow (1891)

Развитие методов математического моделирования: краткий экскурс в историю

1910-1920-е годы (“Empirical Era”) : начало накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов

*1930-1940-е годы (“Rationalization Era”):
обобщение эмпирических фактов, начало
построения гидрологической теории*

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



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

Развитие методов математического моделирования: краткий экскурс в историю

1970-1980-е годы (“Process era”): создание теории и практики физико-математического моделирования формирования речного стока

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

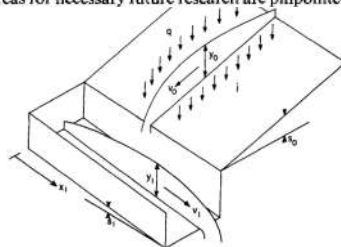
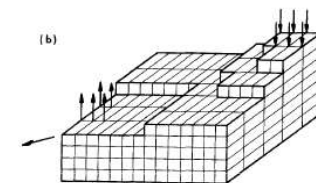
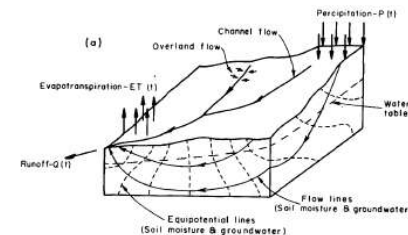
Inland Waters Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Calgary, Alberta, Canada

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 sophistication that can be achieved with presently available areas for necessary future research are pinpointed.



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

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

«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

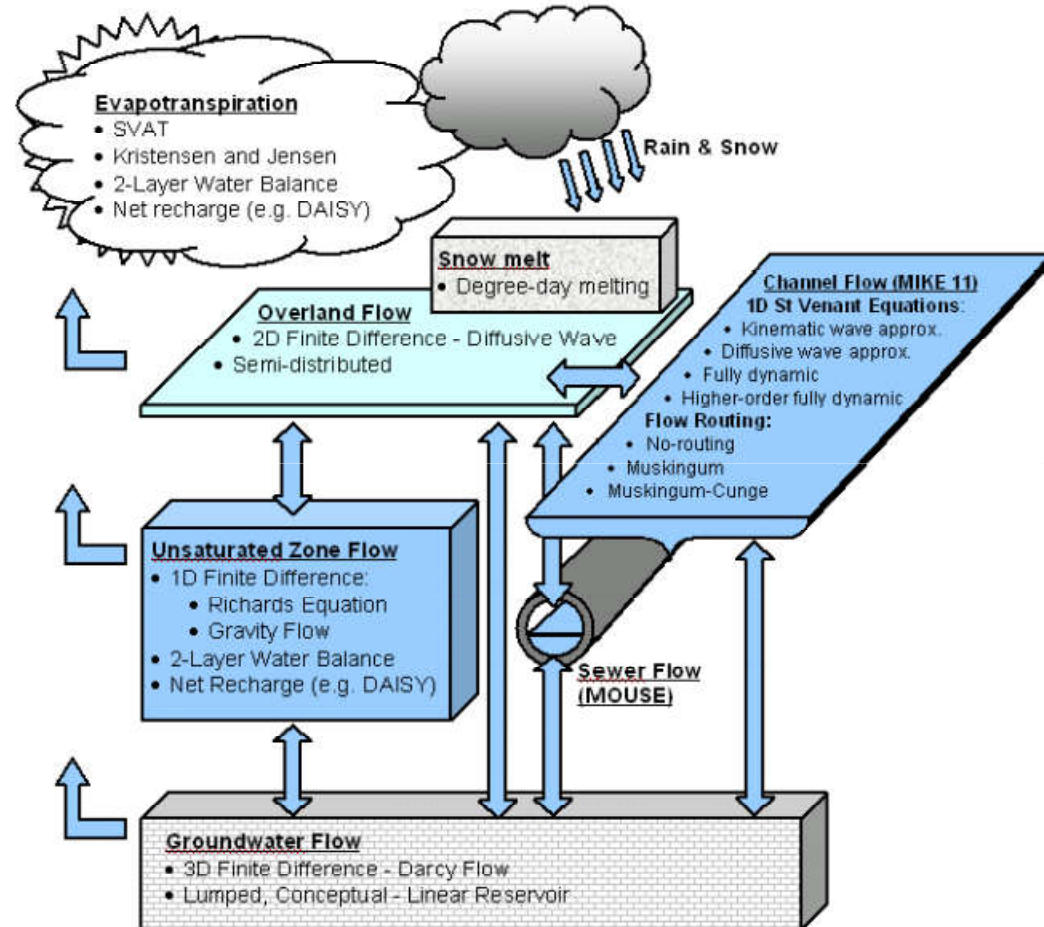


Развитие методов математического моделирования: краткий экскурс в историю

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)



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

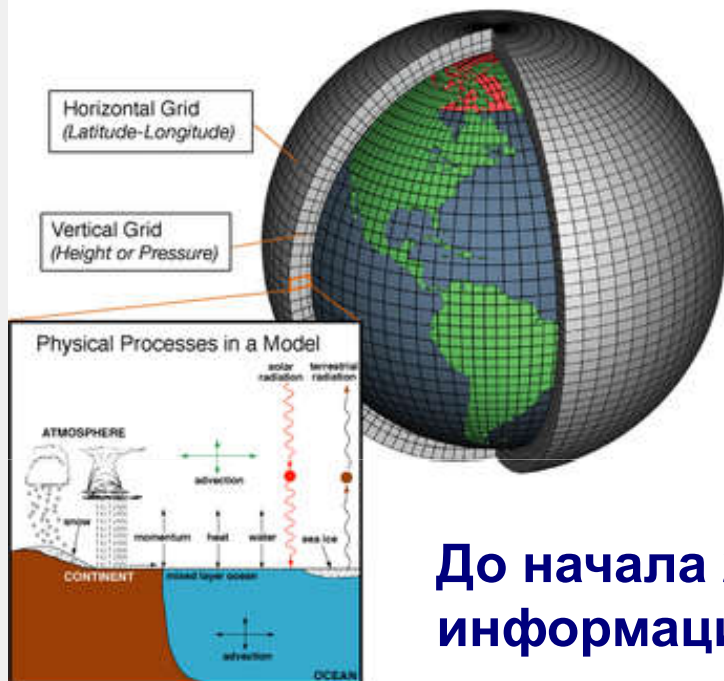
**Thus, by the end of 1980s,
hydrological society began to develop
watershed modelling systems
founded on basic physical principles.
Hydrology began to form as
geophysical science, similarly to the
related scientific disciplines, such as
meteorology, climatlogy, oceanology.**



«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

Brief retrospective of computer weather prediction and atmospheric circulation modelling



“Among the most significant scientific advances of the past century is our ability to simulate complex physical systems using numerical models and therewith to predict their evolution. One outstanding example is the development of general circulation models (GCMs) of the atmosphere and ocean” (P. Linch, 2007)

До начала 20 века – накопление метеорологической информации и попытки построения эмпирических прогностических зависимостей статистическими методами (открытие южной осцилляции).

«...mainstream meteorology had largely given up attempting to forecast the state of the atmosphere using statistical approaches based solely on data” (Nebeker 1995)

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



1890: “meteorology is essentially the application of hydrodynamics and thermodynamics to the atmosphere” (Cleveland Abbe “The physical basis of long-range weather forecasting”)



1904: Vilhelm Bjerknes предложил двухшаговую процедуру прогноза погоды: (1) диагностика (расчет начальных условий с использованием наблюдений) и (2) прогноз путем решения системы семи уравнений состояния атмосферы. Решения качественные (графические методы)



1911: Lewis Fry Richardson реализовал и развил прогностическую схему Бьеркенса. Но без компьютеров эта схема была по-прежнему нереализуема «Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances But that is a dream.» («Weather Prediction by Numerical Process», 1922)

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



ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

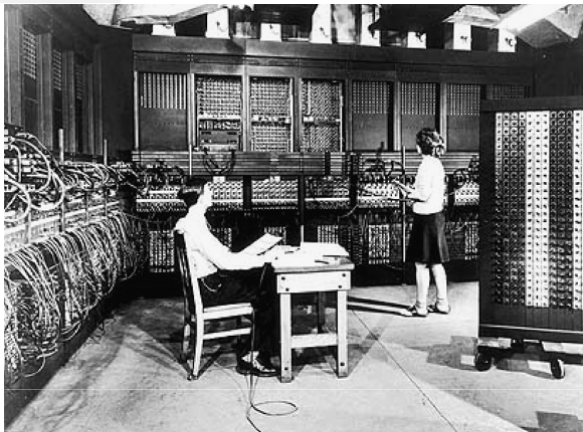
с 1967 года



An artist's impression of the “Forecast Factory” described by Lewis F. Richardson in “Weather Prediction by Numerical Process”, Section 11.2 “The Speed and Organization of Computing” (from Lynch, 2008)

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

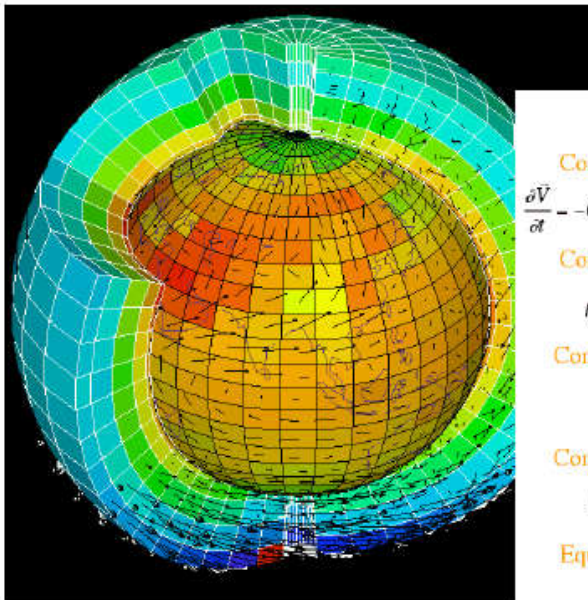
The Electronic Computer Project of von Neumann



Первые прогнозы погоды, основанные на численном интегрировании гидродинамических уравнений состояния атмосферы – начало 1950-х годов



Jule Charney



Решаемая система уравнений гидротермодинамики атмосферы:

Basic Equations

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

Conservation of energy:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k \nabla T) + C + S$$

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

Conservation of H₂O (vapor, liquid, solid):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k \nabla q) + S_q + E$$

Equation of state:

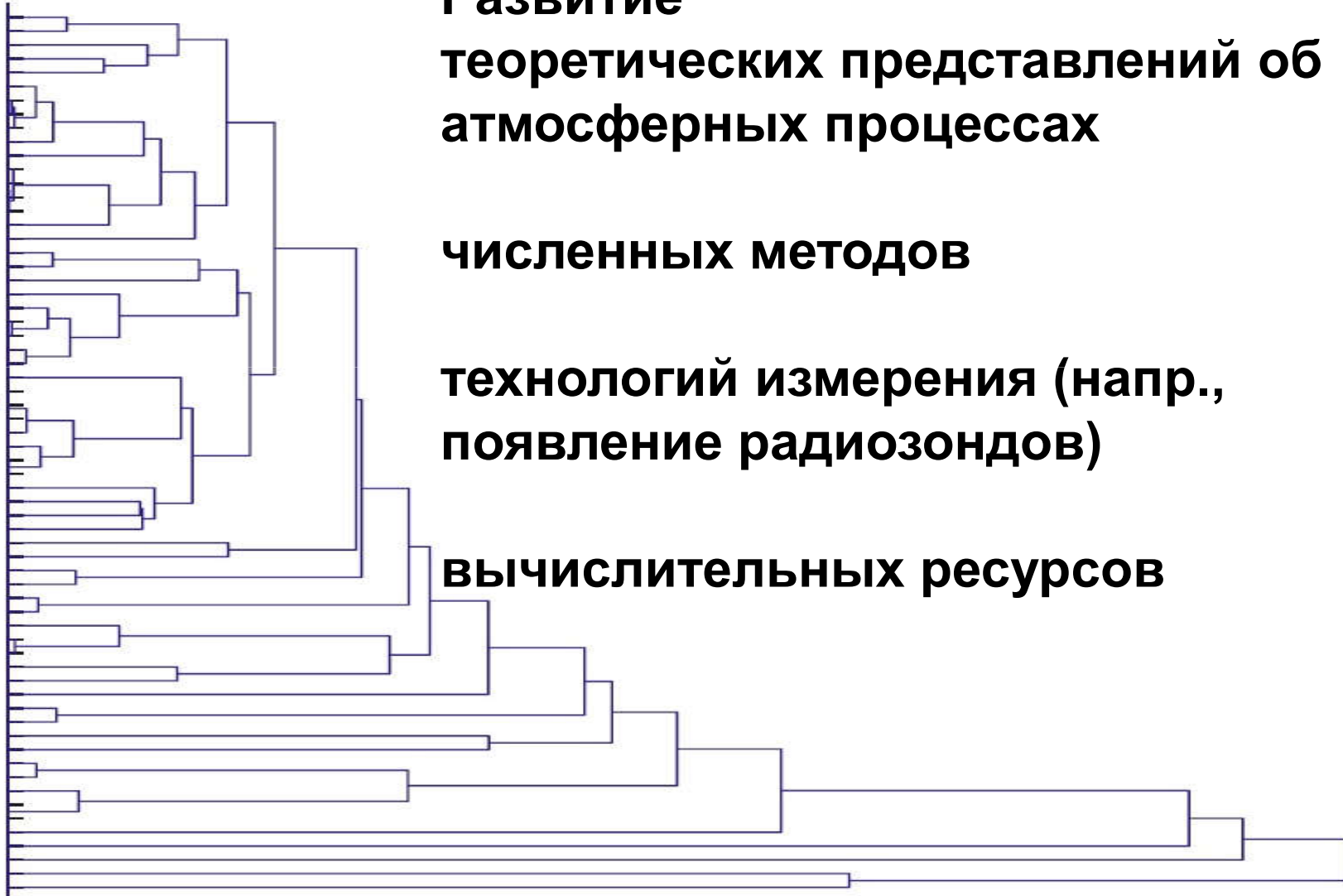
$$p = \rho R_d T$$

\vec{V} = velocity
 T = temperature
 p = pressure
 ρ = density
 q = specific humidity
 \vec{g} = gravity
 $\vec{\Omega}$ = rotation of earth
 \vec{F}_d = drag force of earth
 \vec{R} = radiation vector
 C = conductive heating
 c_p = heat capacity, const. p
 E = evaporation
 S = latent heating
 S_q = phase-change source
 k = diffusion coefficients
 R_d = dry air gas constant



Modern GCM Genealogy

BCCR-BCM2.0
CNRM-CM3
INGV-SXG
*CNRM-CM5
*EC-EARTH
GFDL-CM2.0
GFDL-CM2.1
*GFDL-ESM2M
*GFDL-ESM2G
*GFDL-CM3
*GFDL-CM2.5
ECHAM5/MPI-OM
*MPI-ESM-LR
*MPI-ESM-P
*MPI-ESM-MR
*CMCC-CM
*MIROC
CSIRO-Mk3.0
CSIRO-Mk3.5
*CanESM2
UKMO-HadCM3
UKMO-HadGEM1
*HadGEM2-CC
*HadGEM2-ES
*ACCESS1.0
*ACCESS1.3
CCSM3
*CCSM4
*CESM1(FASTCHEM)
*CESM1-BGC
*CESM1(CAM5)
*CESM1(WACCM)
*NorESM1-M
*NorESM1-ME
*BCC-CSM1.1
*FGOALS-g2
*FIO-ESM
*FGOALS-a2
ECHO-G
MRI-CGCM2.3.2
ERA40/GPCP
NCEP/CMAP
CGCM3.1(T47)
CGCM3.1(T63)
IPSL-CM4
*IPSL-CM5A-LR
*IPSL-CM5A-MR
*IPSL-CM5B-LR
*MRI-CGCM3
*CSIRO-Mk3.6.0
*GISS-E2-H
*GISS-E2-R
INM-CM3.0
PCM
MIROC3.2(hires)
*MIROC4h
MIROC3.2(medres)
*MIROC-ESM
*MIROC-ESM-CHEM
*INM-CM4
GISS-EH
FGOALS-g1.0
GISS-AOM
GISS-ER



Развитие
теоретических представлений об
атмосферных процессах

численных методов

технологий измерения (напр.,
появление радиозондов)

вычислительных ресурсов



| Model name/acronym | Author(s) (year) | Remarks |
|--|---|---|
| Stanford watershed Model (SWM)/Hydrologic Simulation Package-Fortran IV (HSPF) | Crawford and Linsley (1966), Bicknell et al. (1993) | Continuous, dynamic event or steady-state simulator of hydrologic and hydraulic and water quality processes |
| Catchment Model (CM) | Dawdy and O'Donnell (1965) | Lumped, event-based runoff model |
| Tennessee Valley Authority (TVA) Model | Tenn. Valley Authority (1972) | Lumped, event-based runoff model |
| U.S. Department of Agriculture Hydrograph Laboratory (USDAHL) Model | Holtan and Lopez (1971), Holtan et al. (1974) | Event-based, process-oriented, lumped hydrograph model |
| U.S. Geological Survey (USGS) Model | Dawdy et al. (1970, 1978) | Process-oriented, continuous/event-based runoff model |
| Utah State University (USU) Model | Andrews et al. (1978) | Process-oriented, event/continuous streamflow model |
| Purdue Model | Huggins and Monke (1970) | Process-oriented, physically based, event runoff model |
| Antecedent Precipitation Index (API) Model | Sittner et al. (1969) | Lumped, river flow forecast model |
| Hydrologic Engineering Center—Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) | Feldman (1981), HEC (1981, 2000) | Physically-based, semidistributed, event-based, runoff model |
| Streamflow Synthesis and Reservoir regulation (SSARR) Model | Rockwood (1982), U.S. Army Corps of Engineers (1987), Speers (1995) | Lumped, continuous streamflow simulation model |
| National Weather service-River Forecast System (NWS-RFS) | Burnash et al. (1973a,b), Burnash (1975) | Lumped, continuous river forecast system |



«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

| | | |
|--|---|--|
| University of British Columbia (UBC) Model | Quick and Pipes (1977), Quick (1195) | Process-oriented, lumped parameter, continuous simulation model |
| Tank Model | Sugawara et al. (1974), Sugawara (1995) | Process-oriented, semidistributed or lumped continuous simulation model |
| Runoff Routing Model (RORB) | Laurenson (1964), Laurenson and Mein (1993, 1995) | Lumped, event-based runoff simulation model |
| Agricultural Runoff Model (ARM) | Donigian et al. (1977) | Process-oriented, lumped runoff simulation model |
| Storm Water Management Model (SWMM) | Metcalf and Eddy et al. (1971), Huber and Dickinson (1988), Huber (1995) | Process-oriented, semidistributed, continuous stormflow model |
| Xinjiang Model | Zhao et al. (1980), Zhao and Liu (1195) | Process-oriented, lumped, continuous simulation model |
| Hydrological Simulation (HBV) Model | Bergstrom (1976, 1992, 1995) | Process-oriented, lumped, continuous streamflow simulation model |
| Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL) Model | Croley (1982, 1983) | Physically based, semidistributed continuous simulation model |
| Pennsylvania State University—Urban Runoff Model (PSU-URM) | Aron and Lakatos (1980) | Lumped, event-based urban runoff model |
| Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS) | USDA (1980) | Process-oriented, lumped parameter, agricultural runoff and water quality model |
| Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWERS) | Beasley et al. (1977), Bouraoui et al. (2002) | Event-based or continuous, lumped parameter runoff and sediment yield simulation model |
| Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model | Williams et al. (1984), Williams (1995a,b) | Process-oriented, lumped-parameter, continuous water quantity and quality simulation model |
| Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB) | Williams et al. (1985), Williams (1995a,b) | Process-oriented, semidistributed, runoff and sediment yield simulation model |
| Simulation of Production and Utilization of Rangelands (SPUR) | Wight and Skiles (1987), Carlson and Thurow (1992), Carlson et al. (1995) | Physically based, lumped parameter ecosystem simulation model |
| National Hydrology Research Institute (NHRI) Model | Vandenberg (1989) | Physically based, lumped parameter, continuous hydrologic simulation model |
| Technical Report-20 (TR-20) Model | Soil Conservation Service (1965) | Lumped parameter, event based runoff simulation model |

| | | |
|---|---|--|
| Systeme Hydrologique Europeen/Systeme Hydrologique Europeen Sediment (SHE/SHESED) | Abbott et al. (1986a,b), Bathurst et al. (1995) | Physically based, distributed, continuous streamflow and sediment simulation |
| Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM) | Beven et al. (1987), Calver and Wood (1995) | Physically based, distributed, continuous rainfall-runoff modeling system |
| Physically Based Runoff Production Model (TOPMODEL) | Beven and Kirkby (1976, 1979), Beven (1995) | Physically based, distributed, continuous hydrologic simulation model |
| Agricultural Non-Point Source Model (AGNPS) | Young et al. (1989, 1995) | Distributed parameter, event-based, water quantity and quality simulation model |
| Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS) | Woolhiser et al. (1990), Smith et al. (1995) | Physically based, semidistributed, event-based, runoff and water quality simulation model |
| Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems (GLEAMS) | Knisel et al. (1993), Knisel and Williams (1995) | Process-oriented, lumped parameter, event-based water quantity and quality simulation model |
| Generalized River Modeling Package—Systeme Hydrologique Europeen (MIKE-SHE) | Refsgaard and Storm (1995) | Physically based, distributed, continuous hydrologic and hydraulic simulation model |
| Simple Lumped Reservoir Parametric (SLURP) Model | Kite (1995) | Process-oriented, distributed, continuous simulation model |
| Snowmelt Runoff Model (SRM) | Rango (1995) | Lumped, continuous snowmelt-runoff simulation model |
| THALES | Grayson et al. (1995) | Process-oriented, distributed-parameter, terrain analysis-based, event-based runoff simulation model |
| Constrained Linear Simulation (CLS) | Natale and Todini (1976a,b, 1977) | Lumped parameter, event-based or continuous runoff simulation model |
| ARNO (Arno River) Model | Todini (1988a,b, 1996) | Semidistributed, continuous rainfall-runoff simulation model |
| Waterloo Flood System (WATFLOOD) | Kouwen et al. (1993), Kouwen (2000) | Process-oriented, semidistributed continuous flow simulation model |
| Topographic Kinematic Approximation and Integration (TOPIKAPI) Model | Todini (1995) | Distributed, physically based, continuous rainfall-runoff simulation model |
| Hydrological (CEQUEAU) Model | Morin et al. (1995, 1998) | Distributed, process-oriented, continuous runoff simulation model |
| Large Scale Catchment Model (LASCAM) | Sivapalan et al. (1996a,b,c) | Conceptual, semidistributed, large scale, continuous, runoff and water quality simulation model |



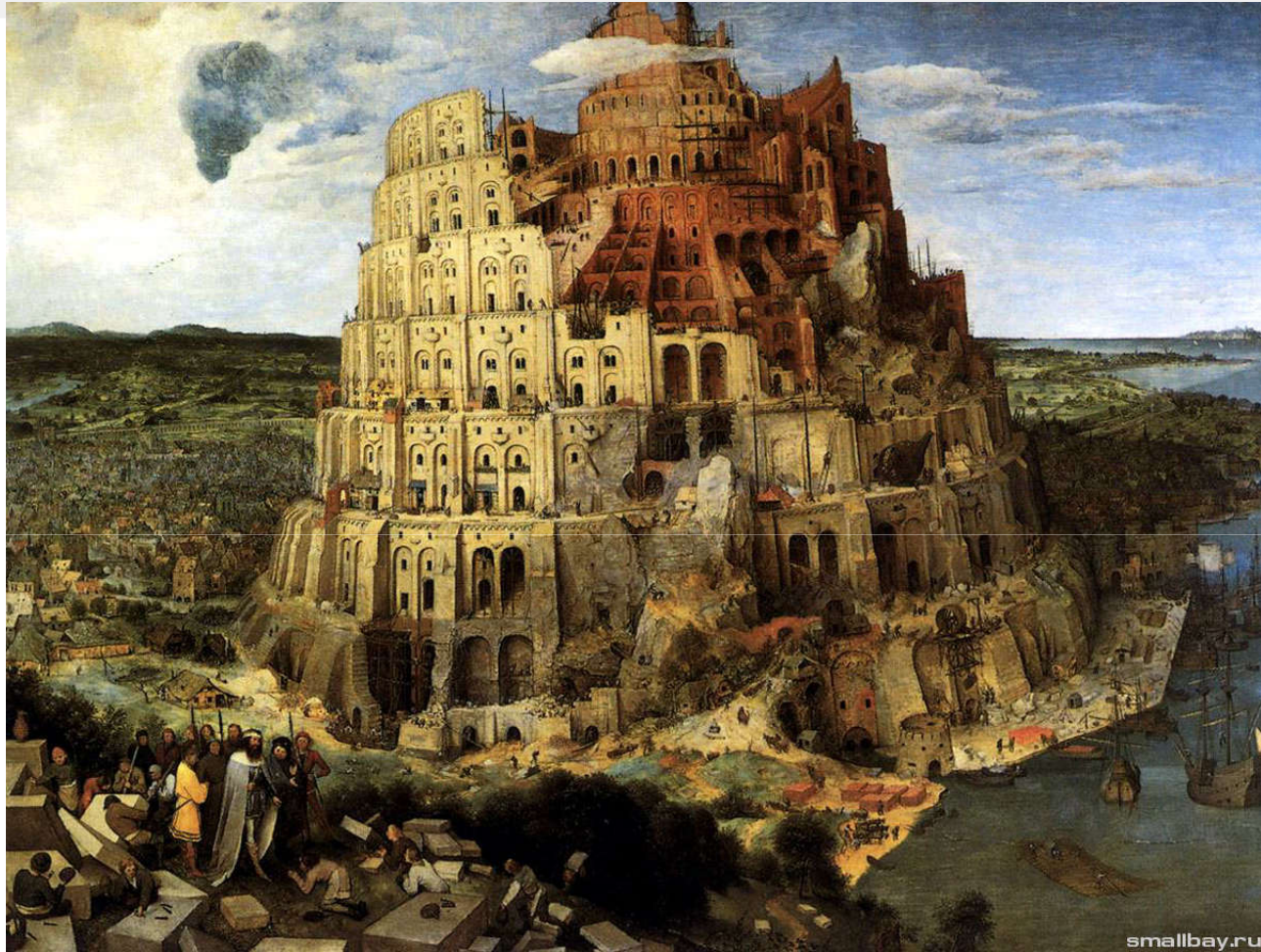
| | | |
|---|---|--|
| Mathematical Model of Rainfall-Runoff Transformation System (WISTOO) | Ozga-Zielinska and Brzezinski (1994) | Process-oriented, semidistributed, event-based or continuous simulation model |
| Rainfall-Runoff (R-R) Model | Kokkonen et al. (1999) | Semidistributed, process-oriented, continuous streamflow simulation model |
| Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT) Model | Ma et al. (1999), Ma and Cheng (1998) | Macroscale, lumped parameter, streamflow simulation system |
| Hydrologic Model System (HMS) | Yu (1996), Yu and Schwartz (1998), Yu et al. (1999) | Physically based, distributed-parameter, continuous hydrologic simulation system |
| Hydrological Modeling System (ARC/EGMO) | Becker and Pfutzner (1987), Lahmer et al. (1999) | Process-oriented, distributed, continuous simulation system |
| Macroscale Hydrological Model-Land Surface Scheme (MODCOU-ISBA) | Ledoux et al. (1989), Noilhan and Mahfouf (1996) | Macroscale, physically based, distributed, continuous simulation model |
| Regional-Scale Hydroclimatic Model (RSHM) | Kavas et al. (1998) | Process-oriented, regional scale, continuous hydrologic simulation model |
| Global Hydrology Model (GHM) | Anderson and Kavvas (2002) | Process-oriented, semidistributed, large scale hydrologic simulation model |
| Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM) | Wigmosta et al. (1994) | Distributed, physically based, continuous hydrologic simulation model |
| Système Hydrologique Europeen Transport (SHETRAN) | Ewen et al. (2000) | Physically based, distributed, water quantity and quality simulation model |
| Cascade two dimensional Model (CASC2D) | Julien and Saghaian (1991), Ogden (1998) | Physically based, distributed, event-based runoff simulation model |
| Dynamic Watershed Simulation Model (DWSM) | Borah and Bera (2000), Borah et al. (1999) | Process-oriented, event-based, runoff and water quality simulation model |
| Surface Runoff, Infiltration, River Discharge and Groundwater Flow (SIRG) | Yoo (2002) | Physically based, lumped parameter, event-based streamflow simulation model |



| Model name/acronym | Author(s) (year) | Remarks |
|--|--|---|
| Modular Kinematic Model for Runoff Simulation (Modular System) | Stephenson (1989) Stephenson and Randell (1999) | Physically based, lumped parameter, event-based runoff simulation model |
| Watershed Bounded Network Model (WBNM) | Boyd et al. (1979, 1996), Rigby et al. (1991) | Geomorphology-based, lumped parameter, event-based flood simulation model |
| Geomorphology-Based Hydrology Simulation Model (GBHM) | Yang et al. (1998) | Physically based, distributed, continuous hydrologic simulation model |
| Predicting Arable Resource Capture in Hostile Environments-The Harvesting of Incident Rainfall in Semi-arid Tropics (PARCHED-THIRST) | Young and Gowing (1996) | Process-oriented, lumped parameter, event-based agro-hydrologic model |
| Daily Conceptual Rainfall-Runoff Model (HYDROLOG)-Monash Model | Wyseure et al. (2002) | Lumped, conceptual rainfall-runoff model |
| Simplified Hydrology Model (SIMHYD) | Potter and McMahon (1976), Chiew and McMahon (1994) | Conceptual, daily, lumped parameter rainfall-runoff model |
| Two Parameter Monthly Water Balance Model (TPMWBM) | Chiew et al. (2002) | Process-oriented, lumped parameter, monthly runoff simulation model |
| The Water and Snow Balance Modeling System (WASMOD) | Guo and Wang (1994) | Conceptual, lumped, continuous hydrologic model |
| Integrated Hydrometeorological Forecasting System (IHFS) | Xu (1999) | Process-oriented, distributed, rainfall and flow forecasting system |
| Stochastic Event Flood Model (SEFM) | Georgakakos et al. (1999) | Process-oriented, physically based event-based, flood simulation model |
| Distributed Hydrological Model (HYDROTEL) | Scafer and Barker (1999) | Physically based, distributed, continuous hydrologic simulation model |
| Agricultural Transport Model (ACTMO) | Fortin et al. (2001a,b) | Lumped, conceptual, event-based runoff and water quality simulation model |
| Soil Water Assessment Tool (SWAT) | Frere et al. (1975) | Distributed, conceptual, continuous simulation model |
| | Arnold et al. (1998) | |



«Вавилонская башня» гидрологической теории



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

In 1900 David Hilbert set out

23 problems to foster mathematical research

He presented 10 of them at the Paris Congress



Mathematische Probleme.

gehalten auf dem internationalen Mathematiker-Kongress zu Paris 1900.

Von

D. Hilbert.

Wer von uns würde nicht gern den Schleier lüften, unter dem die Zukunft verborgen liegt, um einen Blick zu werfen auf die bevorstehenden Fortschritte unsrer Wissenschaft und in die Heimnisse ihrer Entwicklung während der künftigen Jahrhunderte! Welche besonderen Ziele werden es sein, denen die rührenden mathematischen Geister der kommenden Geschlechter

16 решены Ещё 2 не являются корректными математическими проблемами (одна сформулирована слишком расплывчато, чтобы понять, решена она или нет, другая, далёкая от решения, — физическая, а не математическая). Из оставшихся пяти проблем две не решены никак, а три решены только для некоторых случаев.

Hilbert's unsolved problems invigorated 20th century mathematics

| | | | |
|------|---|--|------|
| 9th | Find the most general law of the reciprocity theorem in any algebraic number field. | Partially resolved. ^[n 3] | – |
| 10th | Find an algorithm to determine whether a given polynomial Diophantine equation with integer coefficients has an integer solution. | Resolved. Result: impossible, Matiyasevich's theorem implies that there is no such algorithm. | 1970 |
| 11th | Solving quadratic forms with algebraic numerical coefficients. | Partially resolved. ^[15] | – |
| 12th | Extend the Kronecker–Weber theorem on abelian extensions of the rational numbers to any base number field. | Unresolved. | – |
| 13th | Solve 7-th degree equation using algebraic (variant: continuous) functions of two parameters. | The problem was partially solved by Vladimir Arnold based on work by Andrei Kolmogorov. ^[n 4] | 1957 |
| 14th | Is the ring of invariants of an algebraic group acting on a polynomial ring always finitely generated? | Resolved. Result: no, a counterexample was constructed by Masayoshi Nagata. | 1959 |
| 15th | Rigorous foundation of Schubert's enumerative calculus. | Partially resolved. | – |

“Who among us would not be tempted to lift the veil behind which is hidden the future; to gaze at the coming developments of our science and at the secrets of its development in the centuries to come?”

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





Hydrological Sciences Journal



ISSN: 0262-6667 (Print) 2150-3435 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/thsj20>

Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective

Hydrology is in the same situation as many other sciences which through rapid growth and sub-division have suffered from lack of coordination of effort and incomplete correlation of results. [...] There is, in hydrology, as already noted, (a) a large mass of unassimilated data, (b) a mass of mostly uncoordinated results of research, and (c) a galaxy of unsolved problems (Horton (1931, p. 201))

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

Twenty-three unsolved problems in hydrology

Time variability and change

1. Is the hydrological cycle regionally accelerating/decelerating under climate and environmental change, and are there tipping points (irreversible changes)?
2. How will cold region runoff and groundwater change in a warmer climate (e.g. with glacier melt and permafrost thaw)?
3. What are the mechanisms by which climate change and water use alter ephemeral rivers and groundwater in (semi-) arid regions?
4. What are the impacts of land cover change and soil disturbances on water and energy fluxes at the land surface, and on the resulting groundwater recharge?

Space variability and scaling

5. What causes spatial heterogeneity and homogeneity in runoff, evaporation, subsurface water and material fluxes (carbon and other nutrients, sediments), and in their sensitivity to their controls (e.g. snow fall regime, aridity, reaction coefficients)?
6. What are the hydrologic laws at the catchment scale and how do they change with scale?
7. Why is most flow preferential across multiple scales and how does such behaviour co-evolve with the critical zone?
8. Why do streams respond so quickly to precipitation inputs when storm flow is so old, and what is the transit time distribution of water in the terrestrial water cycle?

Variability of extremes

9. How do flood-rich and drought-rich periods arise, are they changing, and if so why?
10. Why are runoff extremes in some catchments more sensitive to land-use/cover and geomorphic change than in others?
11. Why, how and when do rain-on-snow events produce exceptional runoff?

Interfaces in hydrology

12. What are the processes that control hillslope–riparian–stream–groundwater interactions and when do the compartments connect?
13. What are the processes controlling the fluxes of groundwater across boundaries (e.g. groundwater recharge, inter-catchment fluxes and discharge to oceans)?
14. What factors contribute to the long-term persistence of sources responsible for the degradation of water quality?
15. What are the extent, fate and impact of contaminants of emerging concern and how are microbial pathogens removed or inactivated in the subsurface?

Measurements and data

16. How can we use innovative technologies to measure surface and subsurface properties, states and fluxes at a range of spatial and temporal scales?
17. What is the relative value of traditional hydrological observations vs soft data (qualitative observations from lay persons, data mining etc.), and under what conditions can we substitute space for time?
18. How can we extract information from available data on human and water systems in order to inform the building process of socio-hydrological models and conceptualisations?

Modelling methods

19. How can hydrological models be adapted to be able to extrapolate to changing conditions, including changing vegetation dynamics?
20. How can we disentangle and reduce model structural/parameter/input uncertainty in hydrological prediction?

Interfaces with society

21. How can the (un)certainly in hydrological predictions be communicated to decision makers and the general public?
22. What are the synergies and tradeoffs between societal goals related to water management (e.g. water–environment–energy–food–health)?
23. What is the role of water in migration, urbanisation and the dynamics of human civilisations, and what are the implications for contemporary water management?



«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

“...it is highly likely that instead of mastering partial correlations, fractional noises, finite elements, or infinitely divisible sets, the hydrologist would more profitably spend his time by studying thermodynamics, geochemistry, soil physics, and plant physiology (Klemeš 1986, p. 187S)

Вопросы?

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

В процессе развития методов математического моделирования генезиса речного стока сложилось три основных направления, отличающихся областью применения моделей и используемой исходной информацией

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

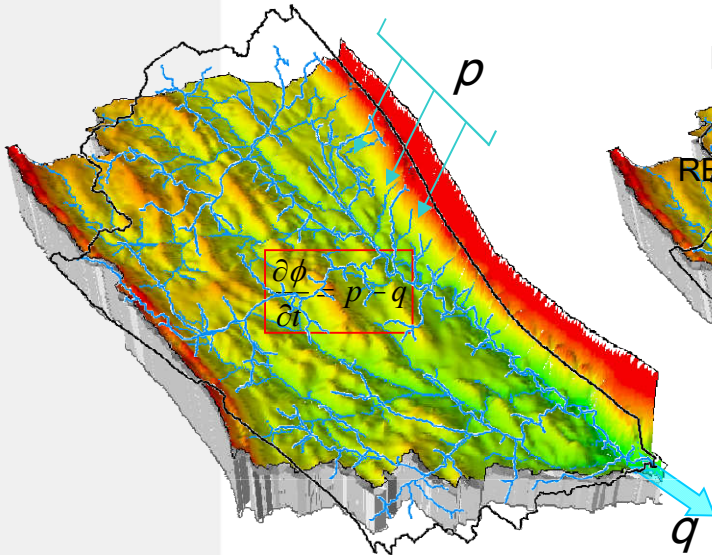
«Математическое моделирование
стока» Кафедра физики моря
Физфака МГУ

ИВП 
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

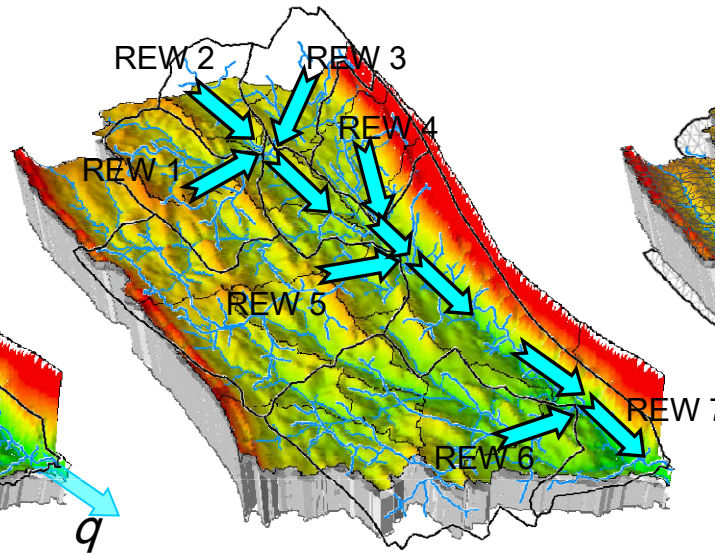
Formalization of hydrologic process equations

Lumped Model



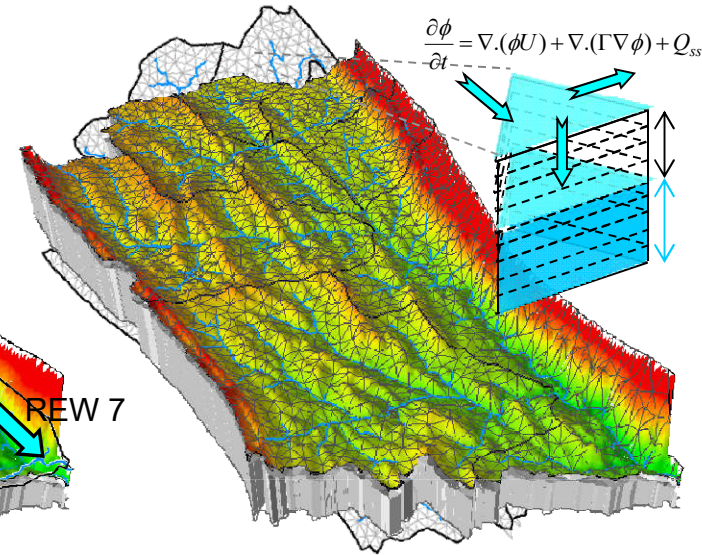
e.g: Stanford Watershed Model

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

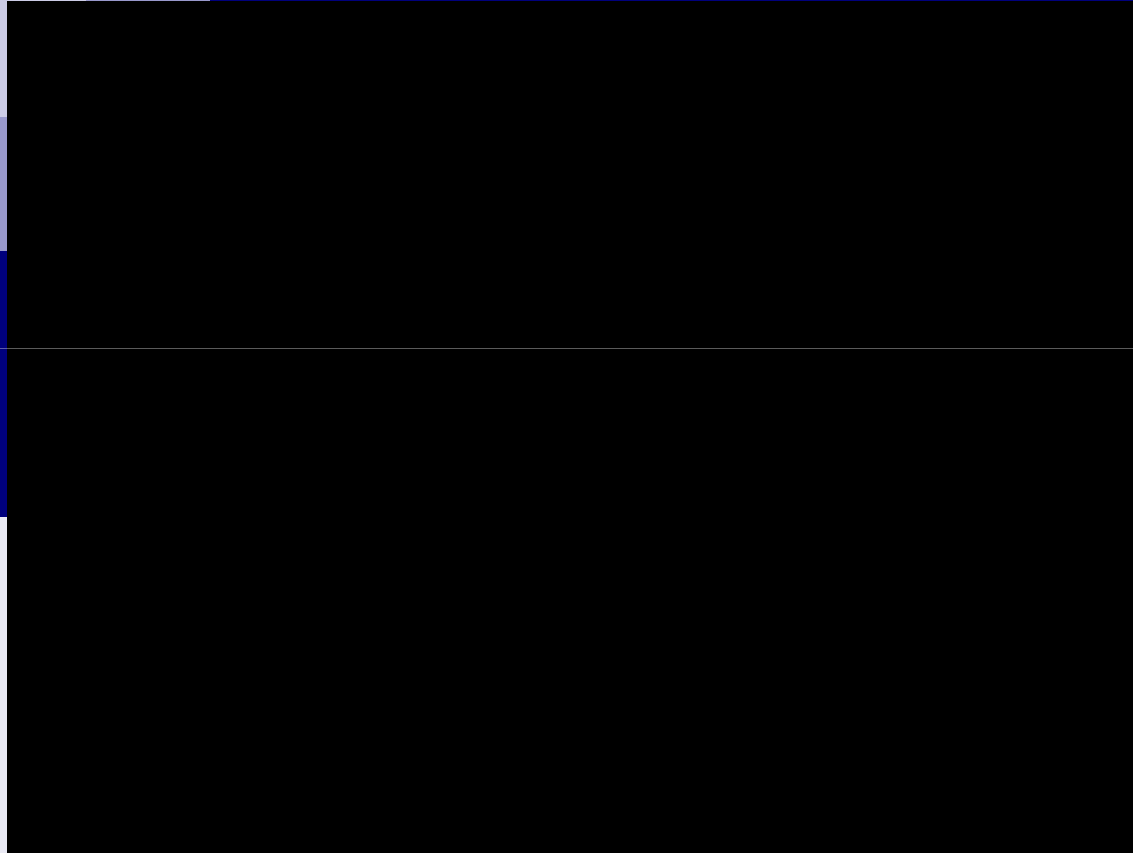
ИВП
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

с 1967 года

Гидрология, как геофизическая наука

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



геоматрическое моделирование
«Ледяная» Кафедра физики моря
Физфака МГУ