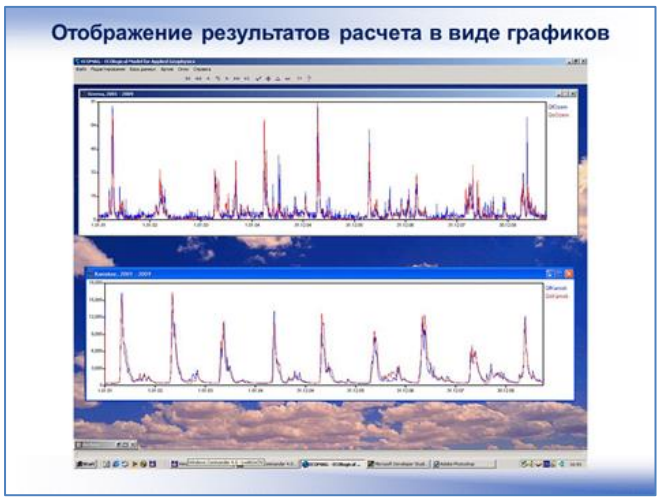
Ю. Г. МОТОВИЛОВ

Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственно-временных масштабах



Москва 2020

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук

Кафедра водных ресурсов

Ю.Г. МОТОВИЛОВ

Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственно-временных масштабах

Рабочая тетрадь к лекциям

Пособие подготовлено в соответствии с Планом выполнения работ по гранту РНФ № 17-77-30006 «Новое поколение моделей, методов и технологий для противодействия современным угрозам водной безопасности»

Москва 2020

УДК 556.5
ББК 31.5

Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственно-временных масштабах: рабочая тетрадь к лекциям. – М., 2020. – 56 с.

ISBN 000-0-0000-0000-0

В учебном издании приводятся презентации лекций по дисциплине «Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственно-временных масштабах», читаемой аспирантам Института водных проблем РАН направления подготовки 05.06.01 Науки о Земле профилей *Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия*; *Геоэкология*; *Гидрогеология* и направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства профиля *Гидравлика и инженерная гидрология*.

Содержание учебного издания соответствует Рабочей программе дисциплины (РПД) и включает в себя слайды презентаций шести лекций. Структура рабочей тетради облегчает работу обучающегося, позволяет конспектировать и делать пометки в течение лекции, что повышает степень усвояемости материала. Для проверки усвоения материала в конце каждой лекции приводятся контрольные вопросы.

© Ю.Г. Мотовилов, 2020
© Институт водных проблем
Российской академии наук, 2020

Оглавление

Введение

Лекция 1. Закономерности формирования стока в речных бассейнах.

Контрольные вопросы по лекции 1.

Лекция 2. Типы и структура гидрологических моделей для описания процессов гидрологического цикла в речных бассейнах в различных пространственно-временных масштабах.

Контрольные вопросы по лекции 2.

Лекция 3. Гидрографическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах с использованием ГИС-технологий.

Контрольные вопросы по лекции 3.

Лекция 4. Моделирование формирования стока в речных бассейнах с использованием компьютерной технологии ECOMAG.

Контрольные вопросы по лекции 4.

Лекция 5. Методические подходы к пространственно-временному анализу полей характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов

Контрольные вопросы по лекции 5.

Лекция 6. Использование результатов моделирования гидрологических процессов в задачах прикладной гидрологии.

Контрольные вопросы по лекции 6.

Ответы к контрольным вопросам по лекциям.

Введение

Предметом изучения дисциплины "Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственно-временных масштабах" являются факторы формирования и перераспределения пресных вод на поверхности суши, в почвенных и грунтовых водах. Диапазон изменения водных ресурсов по различным участкам суши чрезвычайно широк. Пространственные масштабы физических процессов, происходящих в гидрологических системах речных бассейнов, варьируют в диапазоне шести порядков – от малых элементарных водосборов с площадями порядка одного квадратного километра до крупнейших речных бассейнов Земного шара и России, таких как Волга, Лена, Амур и др. с площадями водосборов свыше миллиона квадратных километров. Что касается временных масштабов изменения процессов, то эти масштабы могут меняться в пределах шести-семи порядков - например, характерные скорости горизонтального движения водных масс в отдельных компонентах системы от десятков сантиметров в секунду (русловой сток) до метров в год (глубокий подземный сток). Таким образом, дисциплина посвящена исследованию и моделированию процессов гидрологического цикла суши в различных пространственных и временных масштабах.

Курс лекций будет интересен, в первую очередь, для специалистов-гидрологов и гидротехников. В рамках этого курса будут рассмотрены различные типы гидрологических моделей, причем наибольшее внимание будет уделено физико-математической модели формирования стока ECOMAG, которая на протяжении двух десятков лет интенсивно развивается и используется в России для моделирования процессов формирования стока в крупнейших речных бассейнах России. Эта модель адаптирована под информационное обеспечение, которое доступно в России. Модель применяется в различных организациях для решения исследовательских и прикладных гидрологических задач. В качестве исследовательских задач можно упомянуть такие как исследование гидрологического режима крупнейших речных систем, влияние климата на водные ресурсы крупнейших территорий, влияние антропогенной деятельности в речных бассейнах на изменение водных ресурсов и др. Что касается прикладных задач, то в курсе лекций будут рассмотрены вопросы применения модели для гидрологических расчетов и прогнозов, для оценки паводковой опасности в речных бассейнах, для оценки эффективности противопаводковых мероприятий, которые проводятся на водосборе, для задач регулирования каскадов крупнейших водохранилищ, таких как Волжско-Камский каскад, Ангаро-Енисейский каскад, и ряд других прикладных задач.

Курс будет полезен и для специалистов-гидрохимиков. В последние годы в рамках модельного комплекса ECOMAG кроме гидрологических процессов рассматривается и гидрохимический блок в предположении, что загрязнения в речном бассейне переносятся водными потоками по тем же путям, которые

рассматриваются в гидрологической части модели. Поэтому в настоящее время для задач гидрохимического и экологического плана все чаще используются пространственно-распределенные модели формирования качества вод, позволяющие оценить вклад природной и антропогенной составляющих в загрязнение речных вод.

Рассматриваемые в курсе лекций вопросы могут представлять интерес и для специалистов гидрогеологического профиля, поскольку в рамках рассмотрения процессов гидрологического цикла суши в качестве одного из важных блоков, в том числе, рассматриваются процессы переноса в грунтовых водах. Кроме того, значительное внимание уделено моделированию генетической структуры речного стока, включающей подземную составляющую питания рек.

Рабочая тетрадь к лекциям подготовлена в соответствии с Планом выполнения работ по гранту РНФ № 17-77-30006 «Новое поколение моделей, методов и технологий для противодействия современным угрозам водной безопасности» (Блок образовательных программ).

Лекция 1. Закономерности формирования стока в речных бассейнах.

План лекции:

Структура и взаимодействие процессов гидрологического цикла речных бассейнов, включая впитывание воды в талую и мерзлую почву, просачивание впитавшейся влаги к уровню грунтовых вод, испарение, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и руслового стока.

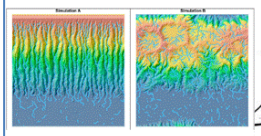
1. _____

2. _____

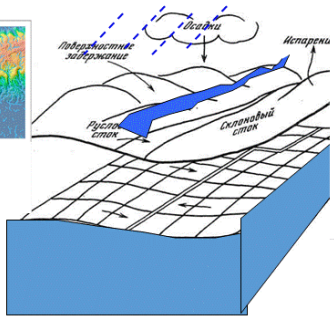
Речной бассейн, как физический объект

1. Речной бассейн – сложная динамическая система.

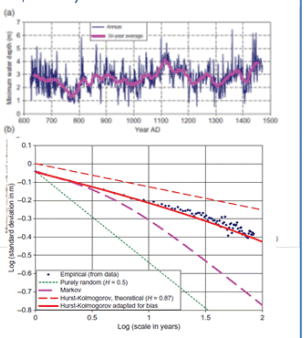
Нелинейная динамика на микромасштабах (напр., flow fingering)



«Пороговая» динамика гидрологических процессов на микро- и мезомасштабах



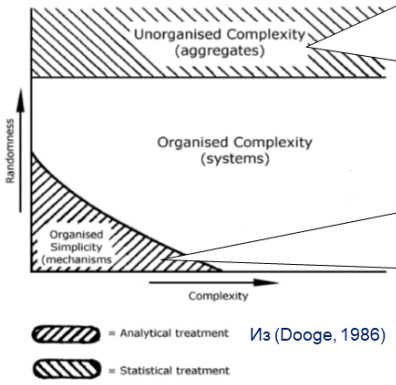
Нелинейная динамика гидрологических процессов на макромасштабах (Koutsoyiannis et al., 2009)



3. _____

Речной бассейн, как физический объект

2. Речной бассейн – динамическая стохастическая система



Из (Dooge, 1986)

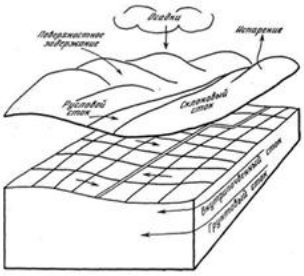
Слабоструктурированные системы с множеством степеней свободы (агрегаты). Вероятностные свойства системы описываются методами статистической физики с учетом неопределенности параметров и/или краевых условий

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

4. _____

Речной бассейн, как физический объект

3. Речной бассейн – квазидвумерная система

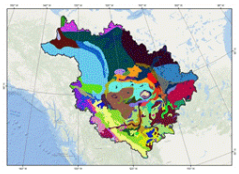


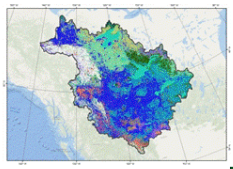
Элементы гидрологической системы речного бассейна, в которых происходят физически значимые процессы вертикального массо- и энергоомена с атмосферой (растительный покров, почвогрунты) и процессы горизонтального массо- и энергопереноса (русловая сеть, водоносные подземные горизонты), можно рассматривать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

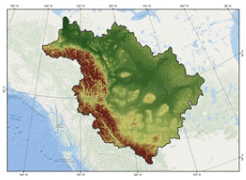
5. _____

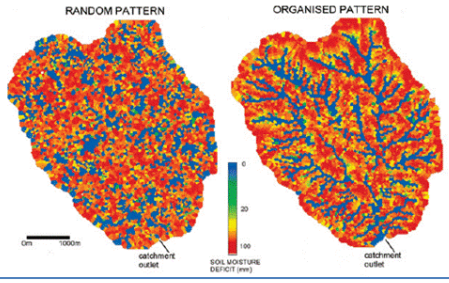
Речной бассейн, как физический объект

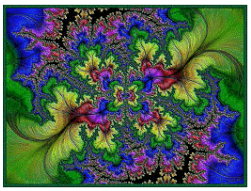
4. Речной бассейн – пространственно неоднородная система







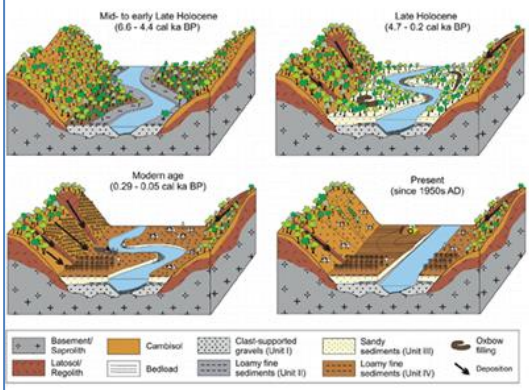




6. _____

Речной бассейн, как физический объект

5. Речной бассейн – эволюционирующая система с переменными параметрами

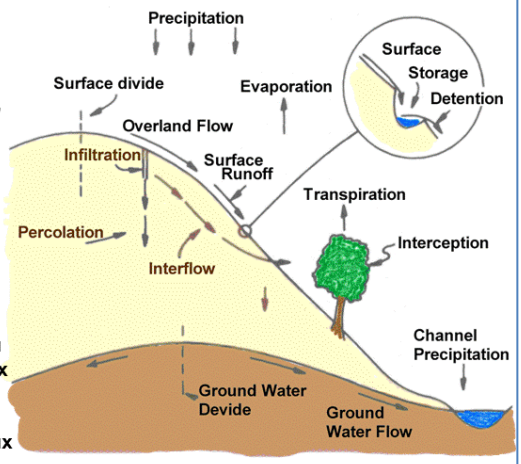


Пространственная организация физических свойств бассейна является следствием многолетней взаимосвязанной эволюции эрозионных форм рельефа, почв, ландшафтов, в том числе, под воздействием климатических факторов и биоты, т.е. речной бассейн представляет собой эволюционирующую систему, физические параметры 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

7. _____

Процессы формирования стока на речном водосборе

1. Задержание осадков растительным покровом и бессточными углублениями рельефа
2. Формирование снежного покрова, абляция снега и льда,
3. Испарение с водной поверхности, с оголенной почвы, транспирация растительным покровом,
4. Инфильтрация воды в почву и вертикальный перенос влаги в ненасыщенной зоне почвы
5. Движение воды по поверхности склонов речного водосбора,
6. Подповерхностное стекание воды вдоль временных или постоянных водоупоров,
7. Движение грунтовых вод,
8. Движение воды в системах речных русел.



8. _____

9. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Контрольные вопросы по лекции 1.

1.1 Почему речной бассейн можно рассматривать как квазидвумерную систему?

1.2 Почему речной бассейн рассматривается как эволюционирующая система с переменными параметрами?

1.3 Перечислите основные процессы формирования стока на речном водосборе.

Лекция 2. Типы и структура гидрологических моделей для описания процессов гидрологического цикла в речных бассейнах в различных пространственно-временных масштабах.

План лекции:

2.1. Типизация гидрологических моделей (модели черного ящика, концептуальные, физико-математические, динамико-стохастические).

2.2. Структура гидрологических моделей в различных пространственно-временных масштабах.

2.3. Методики и алгоритмы генерализации уравнений и параметров влагообмена в физически обоснованных моделях формирования стока при изменении масштабов моделирования.

1. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

В процессе развития методов математического моделирования генезиса речного стока сложилось <u>три основных направления</u>, 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 применятся в технической кибернетике и обычно называется идентификацией динамической системы;

Концептуальные модели стока

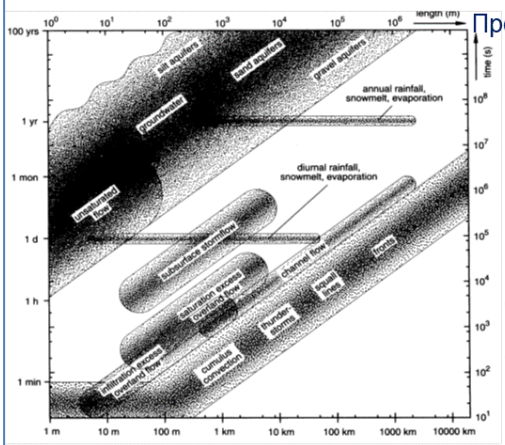
Создаются в условиях, когда физические представления о гидрологической системе неопределенны или неполны, однако имеется ряд априорных зависимостей или гипотетических связей, которые могут быть применены при определении структуры модели или ее параметров

Физико-математические модели формирования стока

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

2. _____

Речной бассейн, как физический объект



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

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).

3. _____

Вехи на пути разрешения проблемы масштаба

По мнению некоторых гидрологов, характерный масштаб речных бассейнов для использования традиционных физико-математических моделей ограничивается размерами небольшого (элементарного) речного бассейна. В его пределах с помощью таких моделей, включающих уравнения, основанные на микрофизике, можно с большой детальностью воспроизводить гидрологические процессы на различных частях склонов и в русловой сети. При укрупнении масштаба моделирования элементарный речной бассейн может являться расчетной единицей для моделирования крупного речного бассейна, состоящего из множества элементарных бассейнов. В этом случае для описания гидрологических процессов уже не требуется такая пространственная детализация, как в физико-математических моделях - в агрегированных моделях оперируют осредненными в пределах элементарных водосборов потоками. Поэтому для описания гидрологических процессов здесь могут быть использованы упрощенные модели, в рамках которых элементарный бассейн рассматривается как расчетная точка (модель с сосредоточенными параметрами).

4. _____

Вехи на пути разрешения проблемы масштаба

REV - репрезентативный элементарный объем в микрофизике

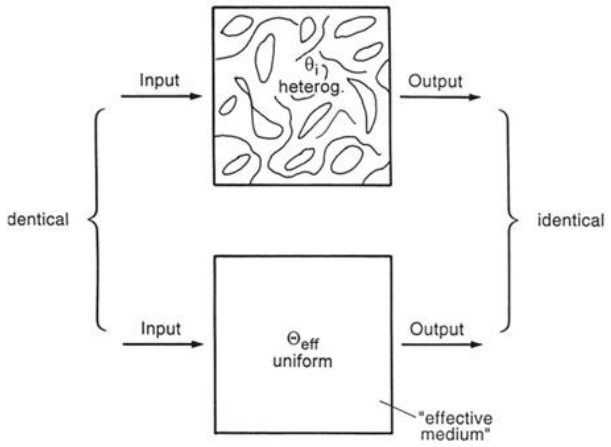
REA - репрезентативная элементарная область (Wood et al., 1988)

REW - репрезентативный элементарный водосбор (Regiani et al., 1998)

Смысл этих концепций заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчетных единиц определенного масштаба (REA или REW) и генерализации (фильтрации) микромасштабных флуктуаций характеристик, имеющих второстепенное значение на данном уровне рассмотрения для различных типов ландшафтов (На определенном масштабе ландшафтный элемент может содержать существенные черты микромасштабной неоднородности геоморфологических, почвенных и других характеристик так, что их результирующее влияние сводит пространственную изменчивость потоков (расходов воды, испарения и т.д.) к минимуму).

5. _____

Частная проблема скейлинга: оценка эффективных параметров



6. _____

Концепция почвенно-гидрологических констант

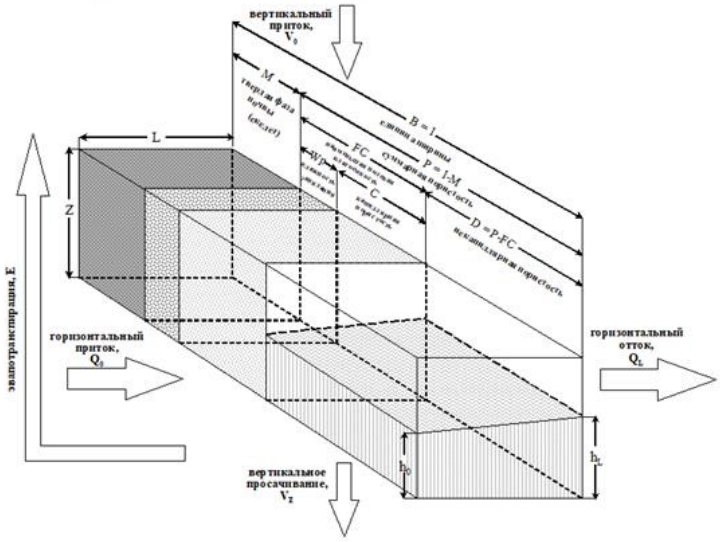
Гигроскопическая влага, **которая сорбируется из атмосферного воздуха на поверхности твердых частиц как результат сил притяжения.**

Капиллярная вода, **которая удерживается силами натяжения неразрывных водных пленок вокруг частиц и капиллярными силами.**

Гравитационная вода, **которая не удерживается почвой и дренируется в более глубокие горизонты под действием сил гравитации.**

7. _____

Концепция почвенно-гидрологических констант



8. _____

Водно-балансовые уравнения

Уравнение сохранения воды для единичного куба

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} - S,$$

$$\int_0^L\int_0^B\int_0^Z \frac{\partial W}{\partial t} dxdydz = \int_0^L\int_0^B\int_0^Z \left(-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_z}{\partial z} - S \right) dxdydz$$

$$Z\frac{dW}{dt} = \frac{Z\left(v_{x,0} - v_{x,L}\right)}{L} + \left(v_{z,0} - v_{z,Z}\right) + ZS.$$

$Q_o = BZv_{x,o}$, $Q_L = BZv_{x,L}$, $E = ZS$, $V_0 = v_{z,0}$ и $V_Z = v_{z,Z}$.

$$Z\frac{dW}{dt} = \frac{Q_0 - Q_L}{BL} + \left(V_0 - V_Z\right) - E.$$

9. _____

Водно-балансовые уравнения

Уравнение водного баланса для капиллярной пористости (индекс c)

$$Z\frac{dW_c}{dt} = \left(V_{c,0} - V_{c,Z}\right) - E_c.$$

Уравнение водного баланса для некапиллярной пористости (индекс nc)

$$Z\frac{dW_{nc}}{dt} = \frac{Q_0 - Q_L}{BL} + \left(V_{nc,0} - V_{nc,Z}\right) - E_{nc}. \qquad h = \frac{ZW_{nc}}{D}$$

$$\frac{D}{2}\frac{d(h_0 + h_L)}{dt} = \frac{Q_0 - Q_L}{BL} + \left(V_{nc,0} - V_{nc,Z}\right) - E_{nc}.$$

Суммарные изменения почвенной влаги в капиллярной и некапиллярной зонах почвенной колонны

$$Z\frac{dW_c}{dt} + \frac{D}{2}\frac{d(h_0 + h_L)}{dt} = \frac{Q_0 - Q_L}{BL} + \left(V_{c,0} - V_{c,Z}\right) + \left(V_{nc,0} - V_{nc,Z}\right) - E_c - E_{nc}.$$

10. _____

Модели процессов в различных масштабах

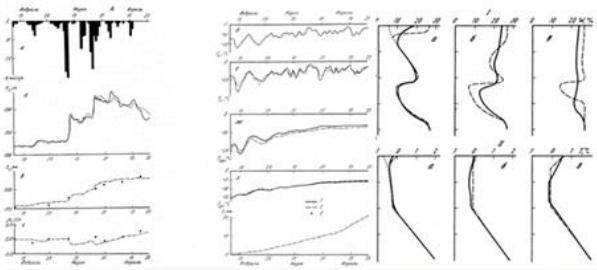
Heat- and moisture transfer in snow, frozen and thawed soil

Detailed version

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z}\left(K\frac{\partial\psi}{\partial Z} - K\right)$$

$$C_{ef}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial Z}\right) + \rho_w C_w\left(K\frac{\partial\psi}{\partial Z} - K\right)\frac{\partial T}{\partial Z} + \rho_i L\frac{\partial I}{\partial t}$$

where $C_{ef} = \rho_w C_w\theta + \rho_i C_i I + \rho_g C_g(1-\rho)$



Simplified version

$$\frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{d}{dt}(Ih_i) = R_s - E_s - S_f + S_f.$$

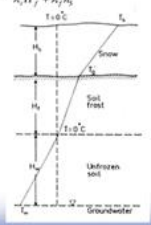
$$\frac{d}{dt}(W_s h_s) = R_s + S_f - E_s - V_s - S_f.$$

$$\frac{dh_s}{dt} = \rho_w\left[\frac{R_s}{\rho_s} - \frac{S_f + E_s}{\rho_s I}\right] - v_s(h_s, I, W_s, T_s)$$

$$Q_f\frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda T_s}{H_s - H_f},$$

$$Q_f = \rho_s L_f(W_f - W_s),$$

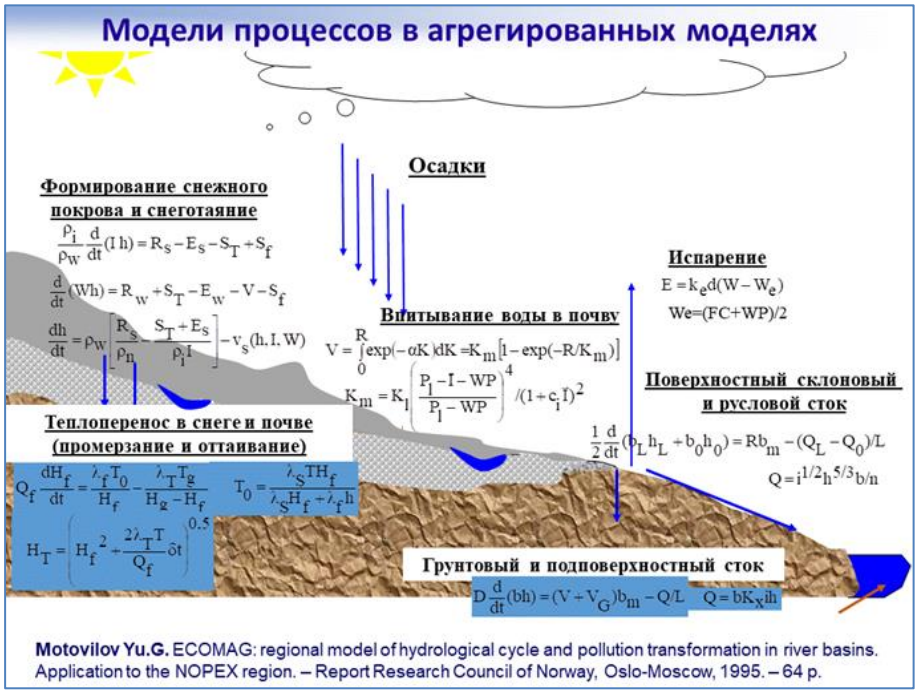
$$T_0 = T\frac{\lambda_s H_f}{\lambda_s H_f + \lambda_f h_s}$$



11. _____

Детальные модели процессов формирования стока
Осадки
Формирование снежного покрова
$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial q_w}{\partial z} - \frac{\rho_I}{\rho_w}\frac{\partial i}{\partial t}$
$C_{ef}\frac{\partial T_s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{ef}\frac{\partial T_s}{\partial z}) + \rho_I L_i \frac{\partial i}{\partial t}$
Эвапотранспирация
$E_f = \rho_a \cdot \frac{q^*(T_f) - q_a}{r_a + r_s} \cdot (1-\eta) \cdot LAI$
$E_g = \rho_a \cdot \frac{r \cdot q^*(T_g) - q_a}{r_{ag}}$
Склоновый сток
$\frac{\partial(hB)}{\partial t} + \frac{\partial(qB)}{\partial x} = q_c$
$q = i^{0.5} h^{1.67} Bn^{-1}$
Мерзлая почва
Тепло-влагоперенос в мерзлой почве
$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\rho_I}{\rho_w}\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial \theta}{\partial z} + D_I\frac{\partial I}{\partial z} - K\right)$
$c_T\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}) + \rho_w c_w (D\frac{\partial \theta}{\partial z} + D_I\frac{\partial I}{\partial z} - K)\frac{\partial T}{\partial z} + \rho_w \chi \frac{\partial W}{\partial t}$
Влагоперенос в незамерзшей почве
$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K\frac{\partial \psi}{\partial z} - K\right]$;
Русловой сток
$\frac{1}{C}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{D}{C}(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x}) + q$

12. _____


Модели процессов в агрегированных моделях
Осадки
Формирование снежного покрова и снеготаяние
$\frac{\rho_i}{\rho_W}\frac{d}{dt}(I\,h) = R_S - E_S - S_T + S_f$
$\frac{d}{dt}(Wh) = R_W + S_T - E_W - V - S_f$
$\frac{dh}{dt} = \rho_W\left[\frac{R_S}{\rho_n} - \frac{S_T + E_S}{\rho_i I}\right] - v_s(h, I, W)$
Впитывание воды в почву
$V = \int_0^R \exp(-\alpha K)dK = K_m[1 - \exp(-R/K_m)]$
$K_m = K_I\left(\frac{P_I - I - WP}{P_I - WP}\right)^4 /(1 + c_i I)^2$
Испарение
$E = k_e d(W - W_e)$
$We = (FC + WP)/2$
Поверхностный склоновый и русловой сток
$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}(b_L h_L + b_0 h_0) = Rb_m - (Q_L - Q_0)/L$
$Q = i^{1/2} h^{5/3} b/n$
Теплоперенос в снеге и почве (промерзание и оттаивание)
$Q_f\frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}$
$T_0 = \frac{\lambda_S T H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h}$
$H_T = \left(H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f}\delta t\right)^{0.5}$
Грунтовый и подповерхностный сток
$D\frac{d}{dt}(bh) = (V + V_G)b_m - Q/L$
$Q = bK_x ih$
Motovilov Yu.G. ECOMAG: regional model of hydrological cycle and pollution transformation in river basins. Application to the NOPEX region. – Report Research Council of Norway, Oslo-Moscow, 1995. – 64 p.

13. _____

Контрольные вопросы по лекции 2.

2.1 Назовите типы детерминированных гидрологических моделей.

2.2 Назовите почвенно-гидрологические константы, разделяющие классы подвижности почвенной влаги.

2.3 Что такое эффективные параметры модели?

Лекция 3. Гидрографическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах с использованием ГИС-технологий.

План лекции:

3.1. Базовые функции ГИС-технологий для гидрографического моделирования речных бассейнов.

3.2. Методика схематизации водосборной площади и русловой сети. Структура речных систем по Хортону, Шриву и российская система.

3.3. Элементарные водосборы. Эволюция и самоорганизация речных бассейнов.

Географические информационные системы

Географическая информационная система (ГИС) представляет собой программно-аппаратный комплекс, осуществляющий сбор, отображение, обработку, анализ и распространение информации о пространственно распределенных объектах и явлениях на основе электронных карт, связанных с ними баз данных и сопутствующих материалов.
Решение поставленных задач должно осуществляться АИУС путем:

- обработки и анализа пространственных данных;
- представления данных в виде карт, диаграмм, графиков, схем;
- взаимодействия с другими информационными системами и технологиями (базами данных, имитационными и прогностическими моделями, экспертными системами);
- создания высококачественной картографической продукции.

Возможность управления большими объемами данных (географических, численных, символьных и графических), объединенных в разнородные базы данных в сочетании с преимуществами визуализации и пространственного анализа, делает ГИС необходимым инструментом для решения задач управления водными ресурсами.

1. _____

_____

_____

_____

_____

_____

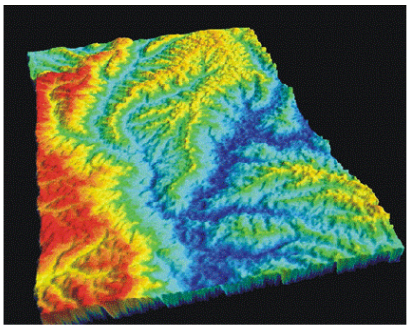
_____

_____

_____

_____

Типы схематизации



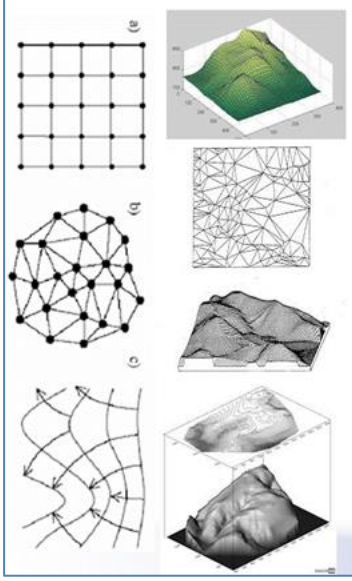
Роль рельефа, как главного фактора, определяющего направления поверхностного и подповерхностного стекания воды, а также широкая распространенность ЦМР

Выбор типа схематизации и размера расчетных элементов определяется особенностями имеющихся данных о рельефе.

Пространственная неоднородность других характеристик подстилающей поверхности (почвы, растительность…) описывается, как правило, в соответствии с детальностью описания рельефа

2. _____

Типы схематизации

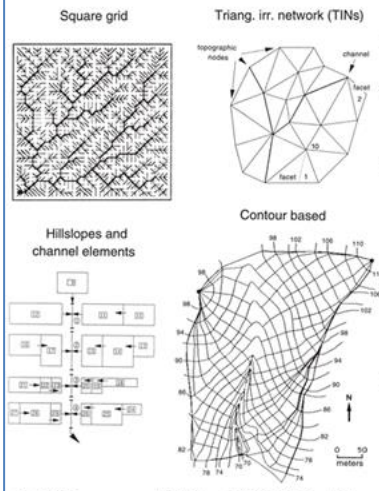


Три типа цифрового представления рельефа:

1. Данные о высоте местности на прямоугольной сетке (напр., Global (1-km resolution) DEM data from the HYDRO1K database of the U.S. Geological Survey) – растровое представление рельефа
2. Данные о высоте местности на нерегулярной сетке (x,y,z) – векторное представление рельефа (triangulated irregular network (TIN))
3. «Контурные данные» - координаты точек вдоль горизонталей (x,y)

3. _____

Типы схематизации



Из R Grayson and G Bloschl (2003) Spatial Modelling of Catchment Dynamics

Четыре типа схематизации водосборной площади в гидрологических моделях:

1. Поверхность водосбора описывается прямоугольными расчетными элементами одинакового размера (пример - SHE)
2. Расчетные элементы разной формы и размера (пример – конечно-элементная схематизация в системе моделей ИВП РАН) или треугольные разного размера (см. HESS2007 "Technical Note: Water flow routing on irregular meshes")
3. Поверхность водосбора описывается расчетными элементами, "привязанными» к горизонталям (редко; примеры – TOPOG, THALES)
4. Упрощенная схематизация, основанная на интегральных характеристиках рельефа («открытая книга», Назаров, 1988, Kuchment, Gelfan, 1991, KINEROS…)

4. _____

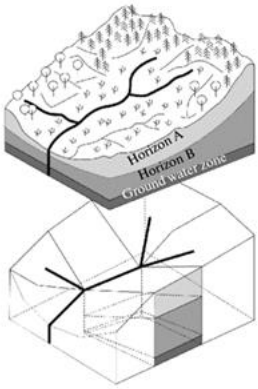
Концепция элементарных бассейнов

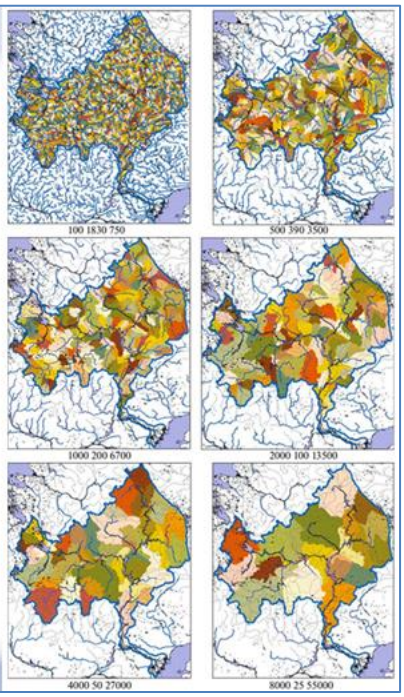
Концепция элементарных бассейнов (representative elementary area (REA) (Wood et al., 1988) или hydrological response unit" (HRU) (e.g. Leavesley and Stannard, 1995) или representative elementary watershed (REW) (Rggiani et al., 2003)

Основана на предположении существования такого пространственного масштаба пространственной дискретизации водосбора, при котором гидрологический эффект изменчивости характеристик подстилающей поверхности внутри расчетной ячейки становится пренебрежимо малым по сравнению с гидрологическим эффектом изменчивости этих характеристик между расчетными ячейками. Для такого масштаба каждая расчетная ячейка может описываться моделью с сосредоточенными параметрами

5. _____

Концепция элементарных бассейнов (ECOMAG)





Motovilov Yu. G. Hydrological Simulation of River Basins at Different Spatial Scales:2. Test Results // Water Resources, 2016, 43(5), с. 743-753

6. _____

ГИС-технология на основе модуля ECOMAG Extention

В качестве основы для разработки инновационной ГИС-технологии принята ГИС семейства ArcView и специализированный модуль Ecomag-extension

Модуль Ecomag-extension позволяет на основе ЦМР в автоматическом режиме выделять речную сеть с необходимым пространственным разрешением, оконтуривать водосборные площади притоков и участков русловой сети, проводить структурно-гидрографический анализ речных сетей, осуществлять операции наложения различных полей и осуществлять математические операции с ними для решения пространсвенных задач гидрологического и водохозяйственного профиля

7. _____

ГИС-технология на основе модуля
ECOMAG Extention
Анализ линий тока и
полей аккумуляции стока
Выделение речной сети
Структура речной сети
(Шрив)
Корректировка рельефа
Структура речной сети
(ECOMAG)

8. _____

_____

_____

_____

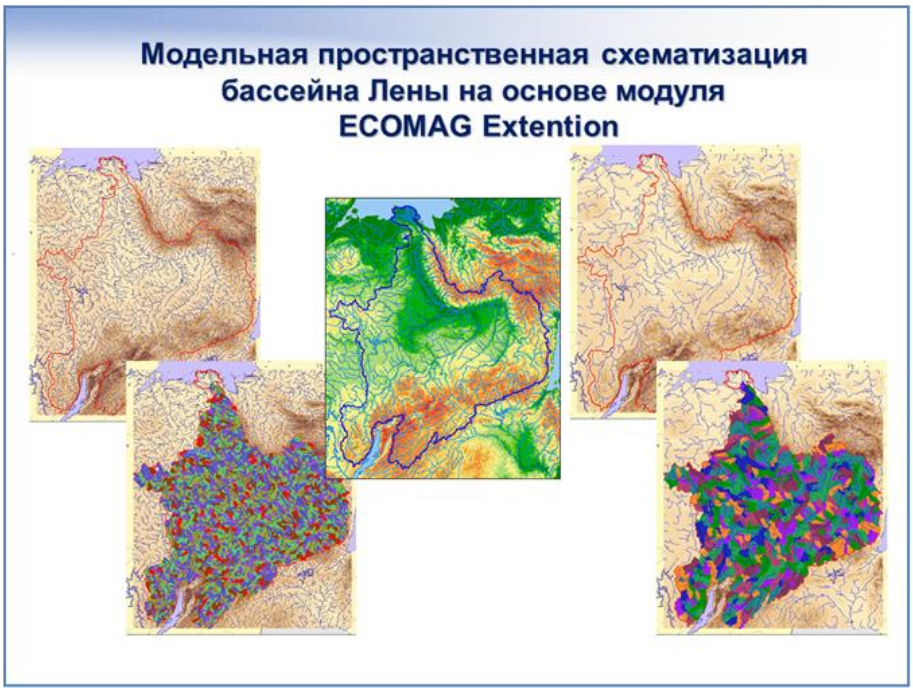
_____

_____

_____

_____

_____


Модельная пространственная схематизация
бассейна Лены на основе модуля
ECOMAG Extention

9. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Контрольные вопросы по лекции 3.

3.1 Какие картографические данные и функция ГИС-технологии задействуются для гидрографического моделирования и пространственной схематизации речного бассейна в ИМК ECOMAG?

3.2 Какие типы пространственной схематизации речных бассейнов используются в физико-математических моделях?

3.3 Какая классификация речной сети используется в ИМК ECOMAG?

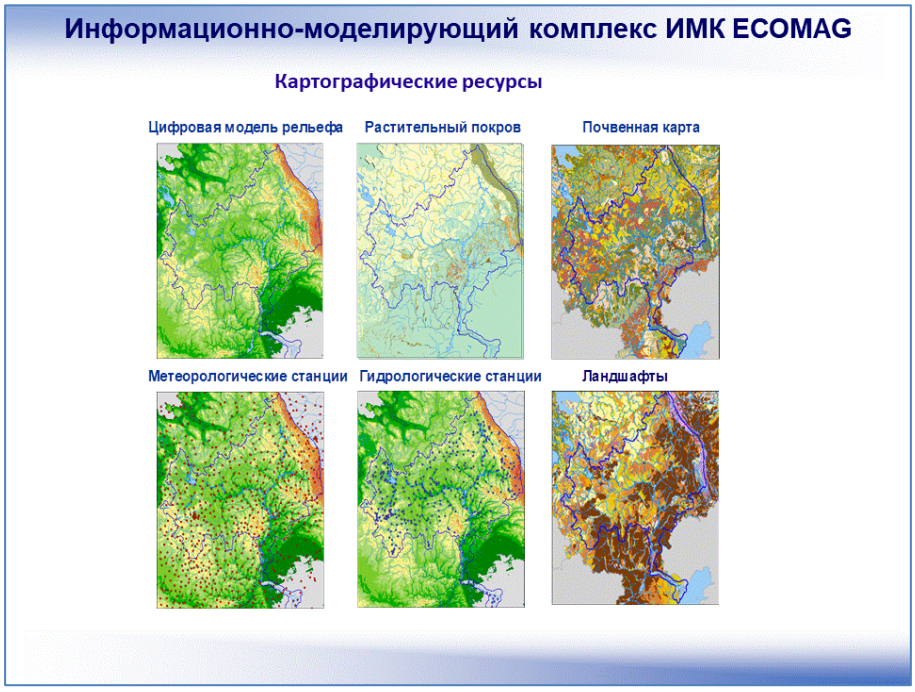
Лекция 4. Моделирование формирования стока в речных бассейнах с использованием компьютерной технологии ECOMAG.

План лекции:

4.1 Структура информационно-аналитического комплекса ECOMAG (ядро программы, информационное обеспечение, базы данных, специализированная ГИС-технология, дружественный интерфейс).

4.2 Методика проведения диагностических и сценарных расчетов стока.

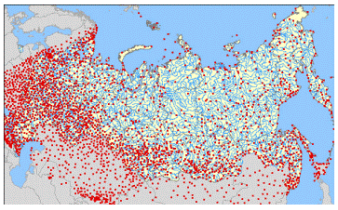
1. _____



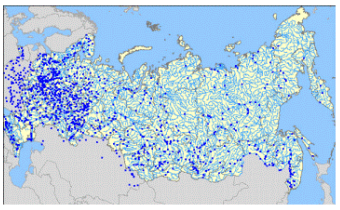
2. _____

Информационно-моделирующий комплекс ИМК ECOMAG

Информационные ресурсы

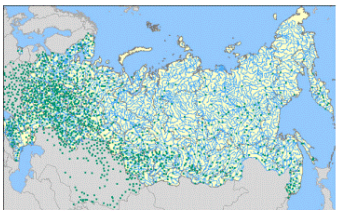


Метеорологические посты



Гидрологические посты

Гидроузлы

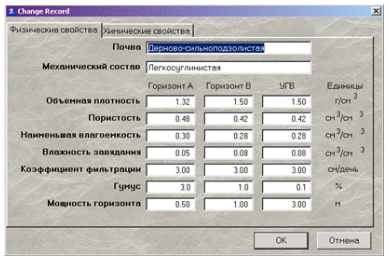


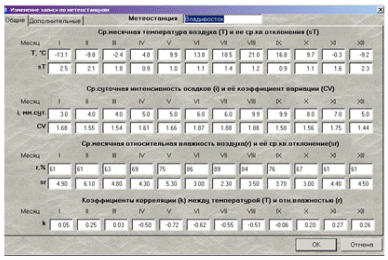
Агрометеорологические посты
и снегомерные маршруты

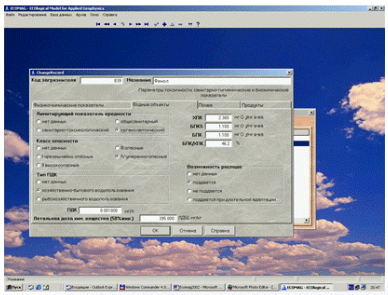
3. _____

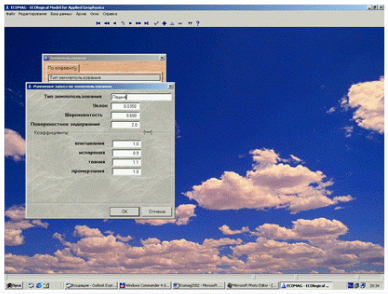
Информационно-моделирующий комплекс ИМК ECOMAG

Базы данных



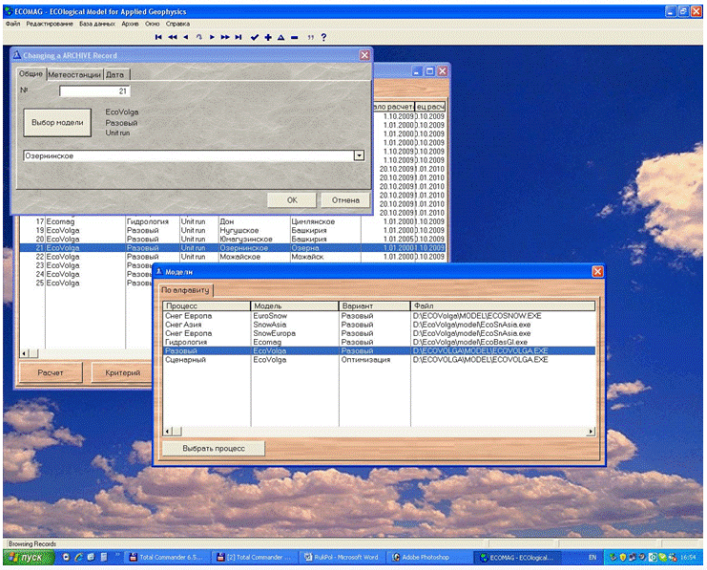






4. _____

Окно «Выбор модели»



5. _____

_____

_____

_____

_____

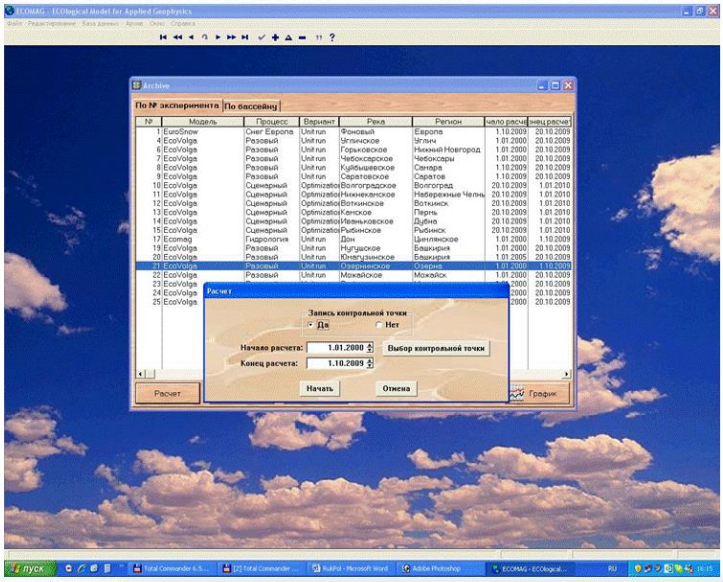
_____

_____

_____

_____

Окно «Расчет»



6. _____

_____

_____

_____

_____

_____

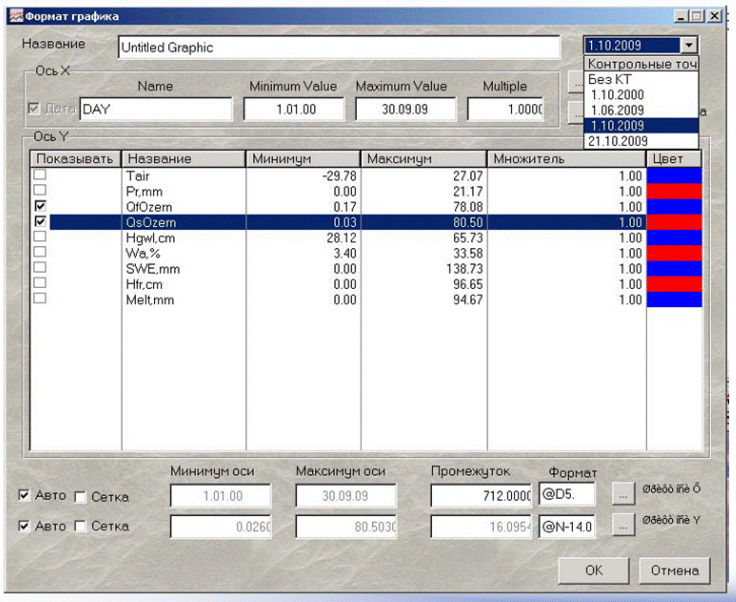
_____

_____

_____

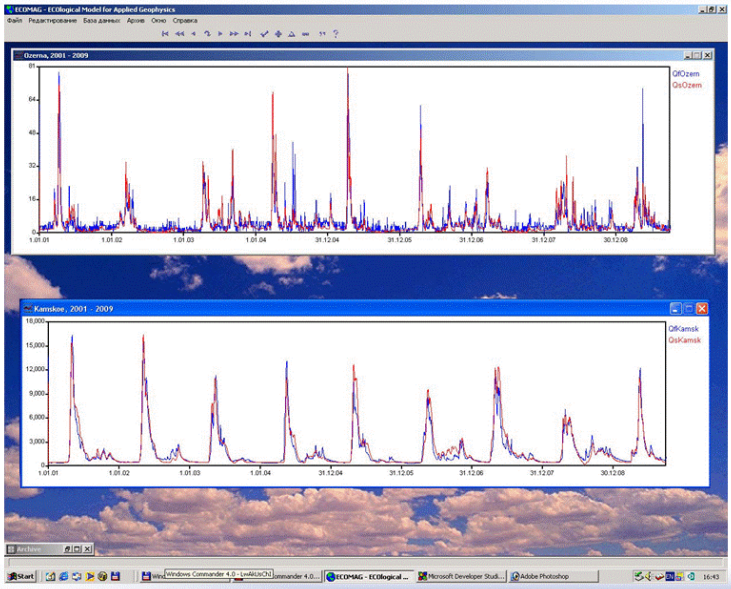
_____

Формат вывода графиков



7. _____

Отображение результатов расчета в виде графиков



8. _____

Контрольные вопросы по лекции 4.

4.1 К какому типу моделей относится модель ECOMAG?

4.2 Что включает в себя информационное обеспечение комплекса ECOMAG?

4.3 Какой тип калибровки модели использован в ИМК ECOMAG?

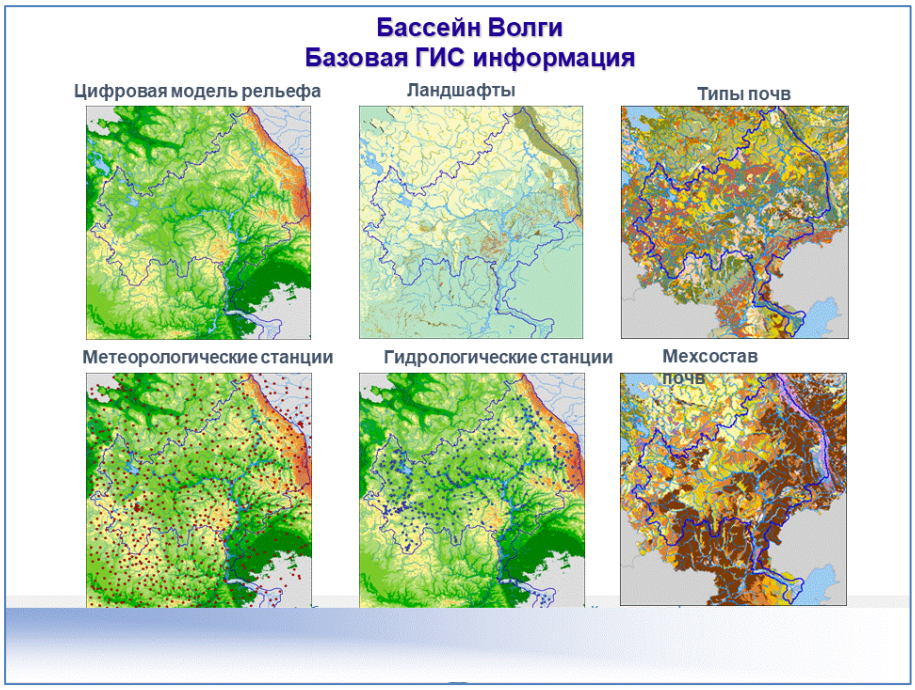
Лекция 5. Методические подходы к пространственно-временному анализу полей характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов

План лекции:

5.1 Методы пространственно-временного анализа полей характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов.

5.2 Критерии соответствия модельных и фактических полей гидрометеорологических характеристик.

5.3 Определение минимальных и максимальных размеров расчетных сеток пространственно-распределенных гидрологических моделей.



1. _____

_____

_____

_____

_____

_____

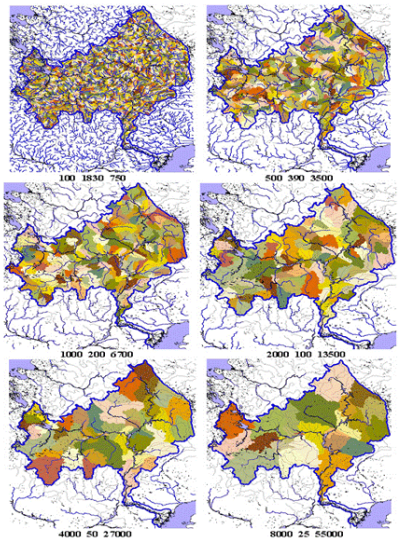
_____

_____

_____

_____

Схематизации речной сети и водосборной площади р. Волги при различных значениях K kr



2. _____

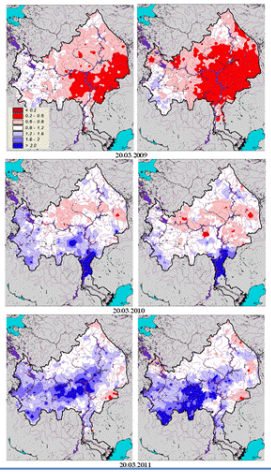
Бассейн Волги (1 350 000 км^2)

Моделирование полей запасов воды в снежном покрове и продуктивной влаги в почве

Данные:
- **350 метеостанций**
- **350 снегомерных пунктов**
- **250 агрометеоро-логических станций**

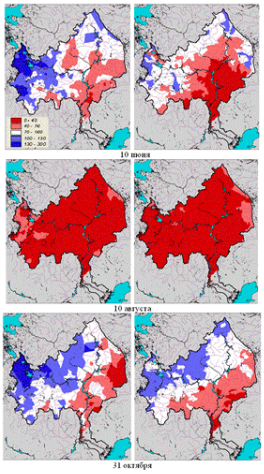
Снегозапасы

Факт. **Расчет**



Влажность почвы

Факт. **Расчет**



3. _____

Критерии эффективности

Одна мониторинговая станция

$$\mathrm{NS} = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{\text{ср}})^2 \quad F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$$

Несколько мониторинговых станций

First version

$$NS_1 = \frac{1}{M} \sum_k NS_k$$

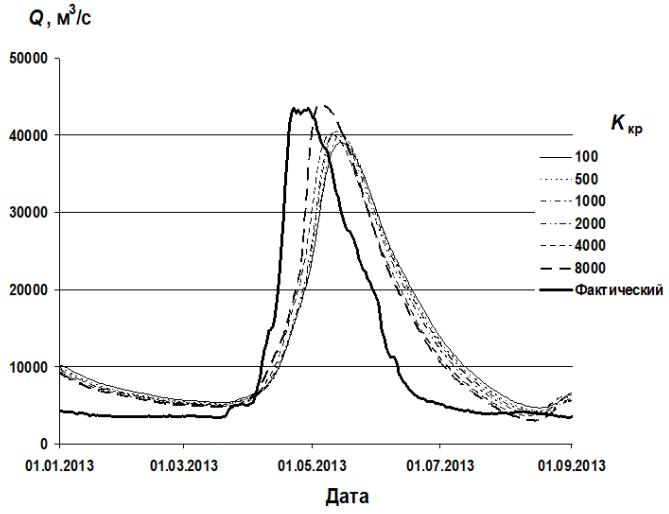
Second version

$$\mathrm{NS}_2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2},$$

$$F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{\text{ср}})^2 \quad F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2 \quad Q_{\text{ср}} = \frac{1}{MN} \sum_k \sum_i Q_{i,k}$$

4. _____

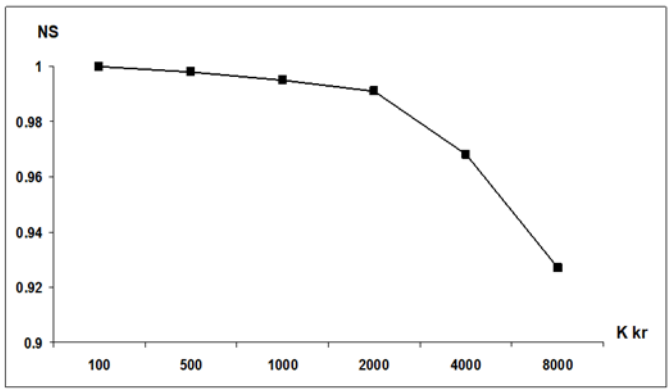
Рассчитанные гидрографы стока у г. Волгограда для гипотетического сценария отсутствия водохранилищ на Волге для различных схематизаций бассейна и фактический гидрограф притока ко всем водохранилищам Волжско-Камского каскада в 2013 г



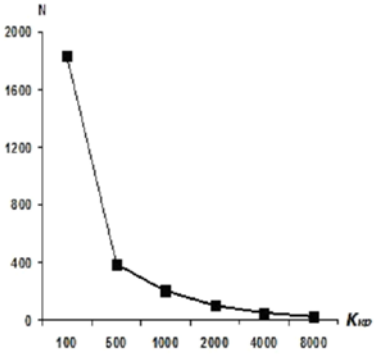
H
Cl
13-15 June 2007

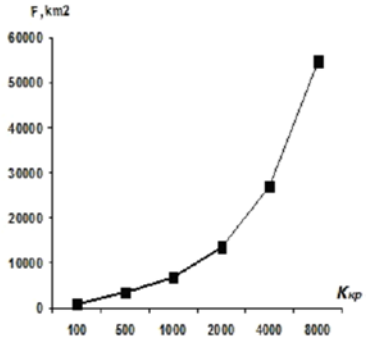
5. _____

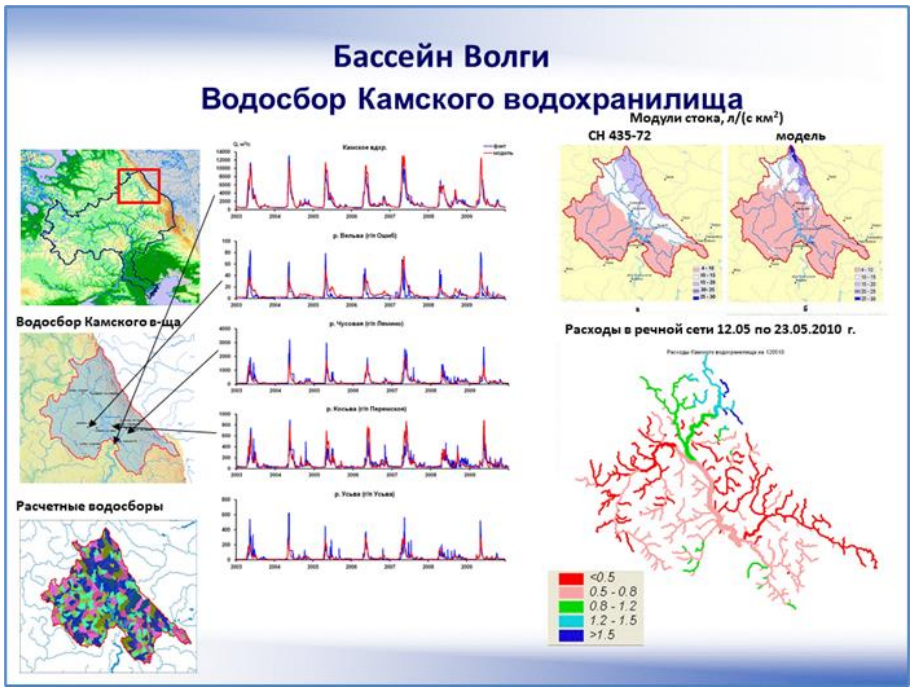
Зависимость критерия Нэша-Сатклифа соответствия рассчитанных гидрографов стока относительно гидрографа при Ккр =100



Hydrological Impact of Climate Change, Novosibirsk, 13-15 June 2007







6. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

7. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

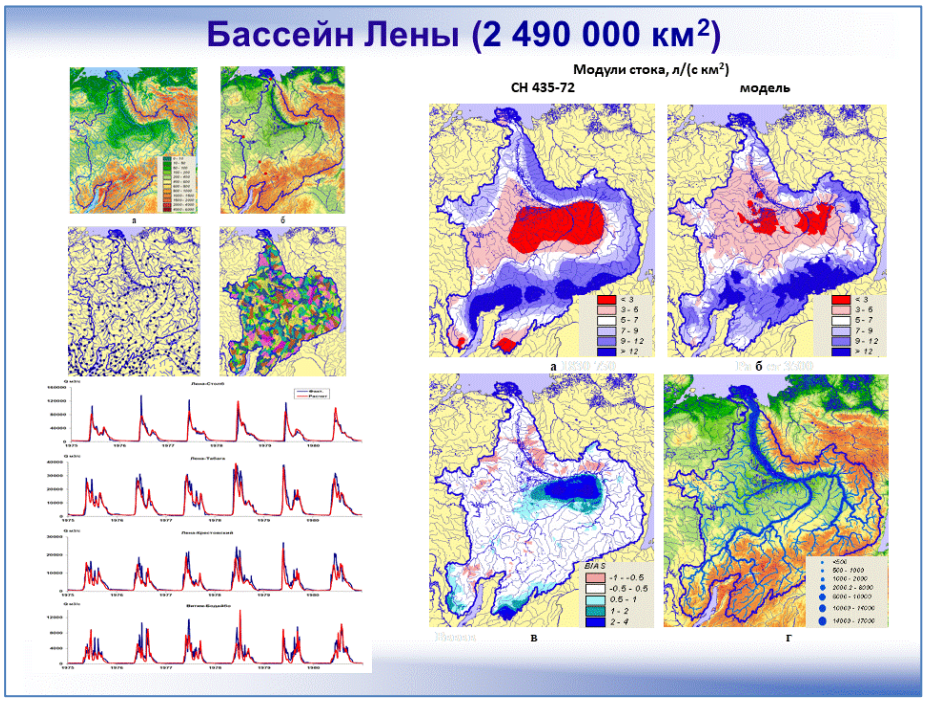
_____

_____

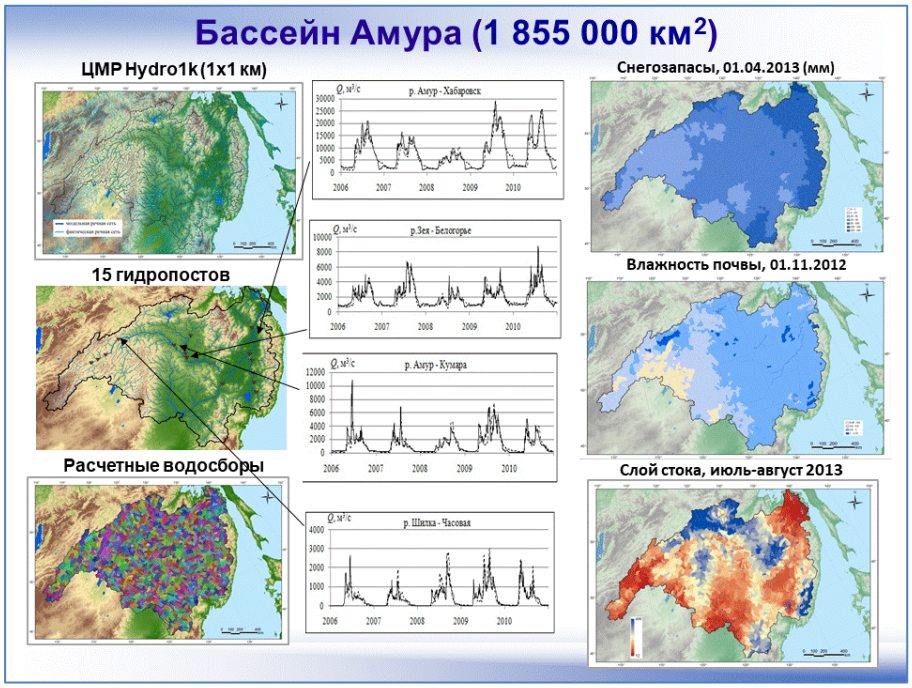
_____

Бассейн Волги
Модель формирования речного стока
(на примере водосбора Нижнекамского водохранилища)
Среднемноголетние модули стока, л/(с км2)
Фактические
Модель
Волга
Водосбор Нижнекамского в-ща
Относительные ошибки расчета
Среднемноголетние расходы, м3/с

8. _____


Бассейн Лены (2 490 000 км2)
Модули стока, л/(с км2)
СН 435-72
модель

9. _____


Бассейн Амура (1 855 000 км²)
ЦМР Hydro1k (1x1 км)
15 гидропостов
Расчетные водосборы
Q, м³/с
р. Амур - Хабаровск
р. Зея - Белогорье
р. Амур - Кумара
р. Шилка - Часовая
Снегозапасы, 01.04.2013 (мм)
Влажность почвы, 01.11.2012
Слой стока, июль-август 2013

10. _____

_____

_____

_____

_____

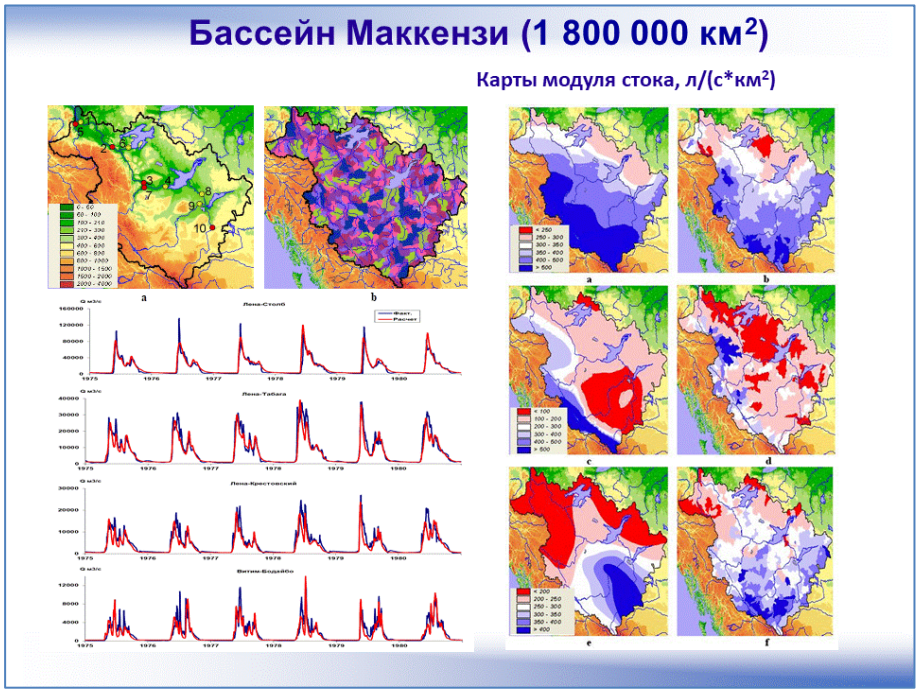
_____

_____

_____

_____

_____


Бассейн Маккензи (1 800 000 км²)
Карты модуля стока, л/(с*км²)
Q м3/с
Лена-Стрелка
Лена-Табага
Лена-Крестовский
Витим-Бодайбо
Факт.
Расчет

11. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Контрольные вопросы по лекции 5.

5.1 Какие статистические критерии соответствия фактических и рассчитанных гидрографов стока наиболее часто используются в гидрологических моделях?

5.2 С чем связана проблема эквифинальности гидрологических моделей?

5.3 Назовите минимальные и максимальные размеры расчетных (элементарных) водосборов модель ECOMAG для речных бассейнов в Европейской части России.

Лекция 6. Использование результатов моделирования гидрологических процессов в задачах прикладной гидрологии.

План лекции:

6.1 Неопределенности в оценках влияния климатических изменений на сток.

6.2 Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей.

6.3 Краткосрочные и долгосрочные прогнозы стока.

6.4 Оперативное гидрологическое обеспечение при регулировании Волжско-Камского (ВКК) и Ангаро-Енисейского (АЕК) каскадов водохранилищ. Общая схема регулирования ВКК.

Компьютерная технология гидроинформационной поддержки управления риском наводнений включает

- **физико-математическую модель формирования стока в речных бассейнах ECOMAG,**
- **одномерную гидродинамическую модель неустановившегося движения в речной системе, основанную на решении системы уравнений Сен-Венана**

1. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Алгоритм гидроинформационной поддержки схематично сводится к следующему:

1. **По модели ECOMAG рассчитываются гидрографы стока в устьях притоков основной реки в зависимости от возможных сценариев гидрометеорологических воздействий, расположения и параметров действующих и планируемых водохранилищ на этих притоках.**

2. По гидродинамической модели Сен–Венана осуществляются расчеты гидрографов стока в створах основной реки, при этом в качестве боковой приточности к участкам русла задаются сценарии гидрографов стока в устьях притоков, рассчитанные по модели ECOMAG.

3. На завершающем этапе проводится анализ результатов моделирования, оцениваются целевые показатели планируемых схем размещения гидроузлов и их характеристик на соответствие требованиям по снижению максимальных уровней, а также экономическая целесообразность строительства водохранилищ исходя из требований по созданию соответствующих противопаводковых емкостей. При неудовлетворительных результатах алгоритм гидроинформационной поддержки может быть повторен с новыми вариантами размещения планируемых гидроузлов и их характеристик до достижения оптимальных показателей по гидроэкологической безопасности и экономической целесообразности.

2. _____

_____

_____

_____

_____

_____

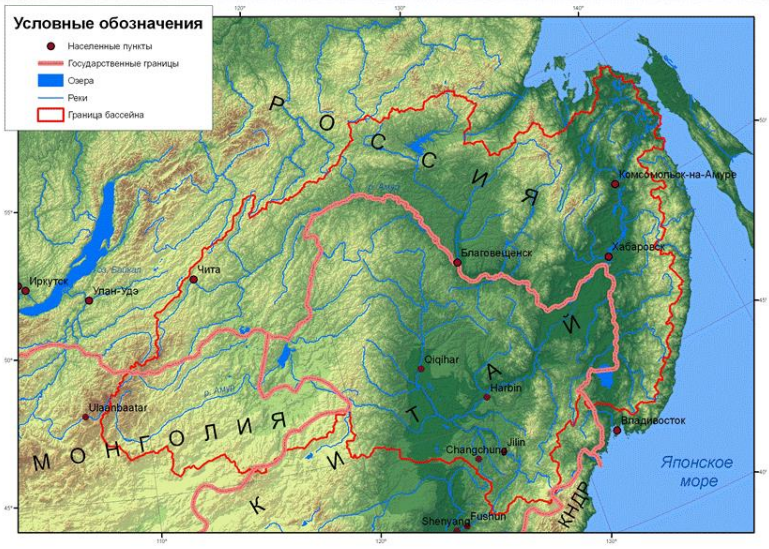
_____

_____

_____

_____

Бассейн Амура



3. _____

_____

_____

_____

_____

_____

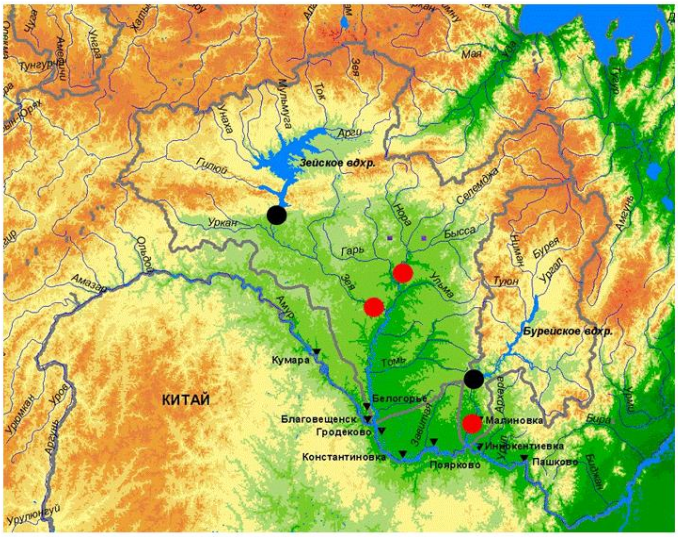
_____

_____

_____

_____

Бассейн Среднего Амура



4. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

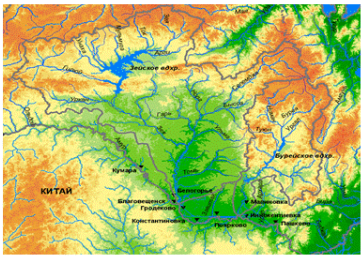
_____

_____

_____

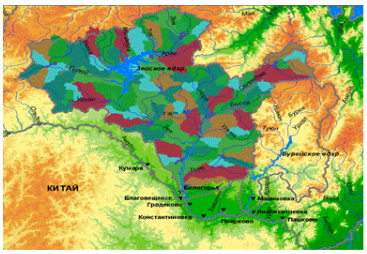
Модельная схематизация речной сети и водосборной площади

Речная сеть

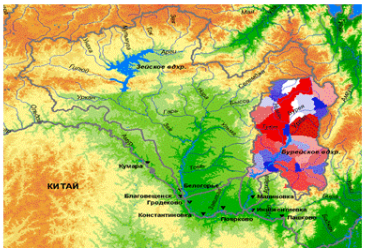


Бассейн Зейского в-ща

Бассейн р. Зеи



Бассейн р. Буреи



5. _____

_____

_____

_____

_____

_____

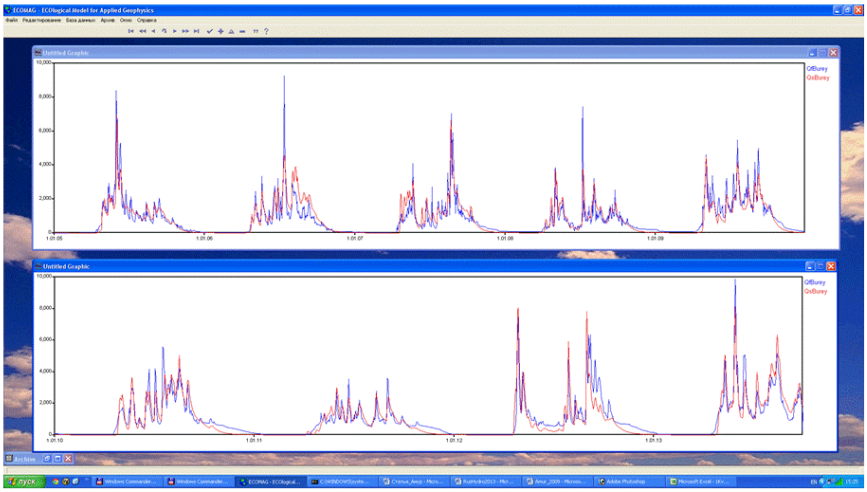
_____

_____

_____

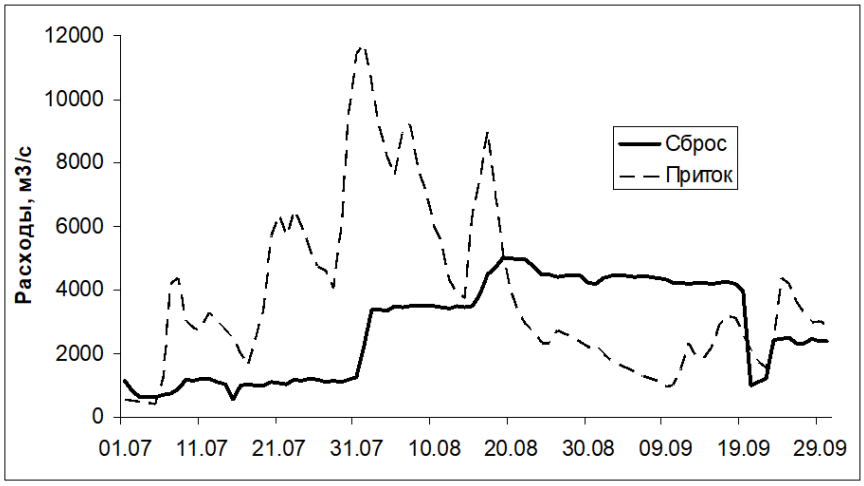
_____

Гидрографы притока воды в Зейское водохранилище в 2005 - 2013 г., R2=0.81



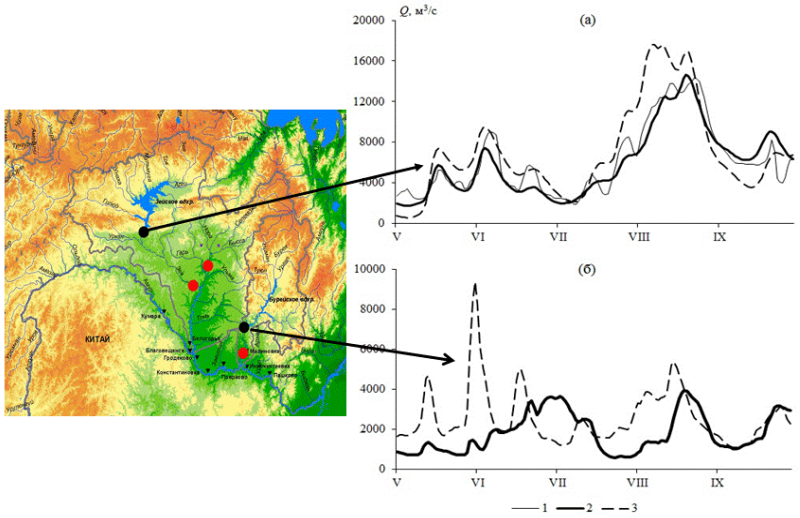
6. _____

Фактические гидрографы притока в Зейское водохранилище и сбросов из него в период паводка 2013 г.



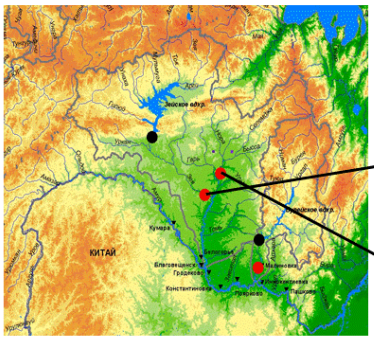
7. _____

Гидрографы стока в устьях Зеи и Буреи в 2013 г. с учетом и без учета регулирования водохранилищ



8. _____

Влияние действующих и планируемых водохранилищ на сток Амура на основе технологии гидроинформационной поддержки управления риском наводнений



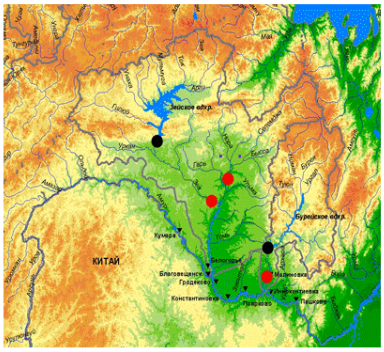
Нижне-Зейское водохранилище

Селемджинское водохранилище

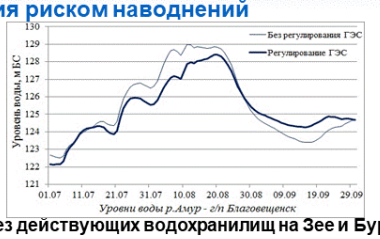
Гидрографы притока и сбросов и динамика наполнения и сработки противопаводковых емкостей на Нижне-Зейском и Селемджинском водохранилищах для паводка 1% обеспеченности

9. _____

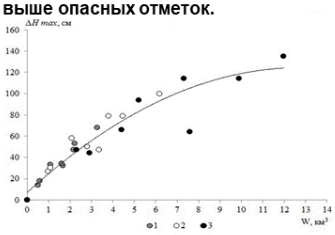
Влияние действующих и планируемых водохранилищ на сток Амура в период паводка 2013 г. на основе технологии гидроинформационной поддержки управления риском наводнений



Эффекты регулирования стока на планируемых Нижне-Зейском и Селемджинском водохранилищах на снижение уровня воды на Среднем Амуре в зависимости от суммарной резервной противопаводковой емкости планируемых водохранилищ (гидропост Гродеково)



Без действующих водохранилищ на Зее и Бурее уровни воды на Среднем Амуре могли подняться на подъеме волны паводка на 1.7 - 2.1 м, а в пик паводка на 0.4 – 0.5 м выше. В 2 – 3 раза могла увеличиться продолжительность стояния уровней воды выше опасных отметок.



10. _____

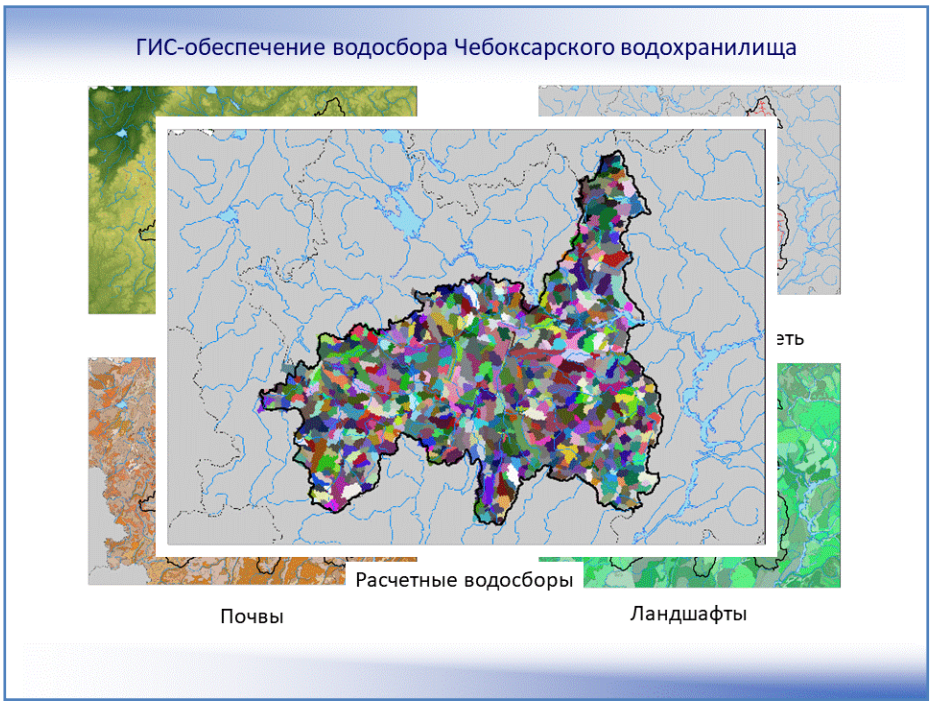
Заключение

Повышение эффективности противопаводковых мероприятий по управлению риском наводнений с учетом действующих и планируемых водохранилищ возможно на основе компьютерных гидроинформационных технологий, опирающихся на современные математические модели гидрологических процессов. Разработанная технология для бассейна Среднего Амура позволяет оценить противопаводковые функции действующих и планируемых водохранилищ на реках Зея и Бурея, эффекты регулирования стока этими водохранилищами на снижение риска наводнений на 850-километровом участке Среднего Амура

11. _____

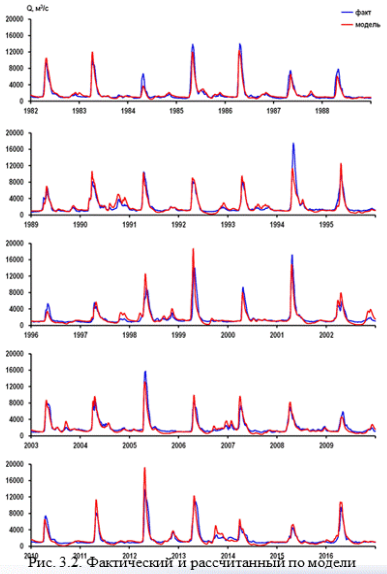
Долгосрочный прогноз притока воды к водохранилищам
Частные водосборные площади водохранилищ ВКК
Расчет распределения по площади характеристик состояния водосбора на 1 апреля (снегозапасов, промерзания и влажности почвы и т.д.), запасы воды в русловой сети
Ансамбль из 48 (1966-2014 гг.) сценариев наблюдавшихся метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (с 1 апреля по 30 июня)
Модель формирования приток воды в Чебоксарское водохранилище
Ансамбль прогнозируемых гидрографов притока воды в Чебоксарское водохранилище
Диагностический расчет по фактическим метеоданным текущего года
Ансамблевый расчет по всем имеющимся метеоданным
Дата выпуска прогноза
Приток к вод-щам ВКК за 2004-2016
s/σ=0.75

12. _____


ГИС-обеспечение водосбора Чебоксарского водохранилища
Расчетные водосборы
Почвы
Ландшафты

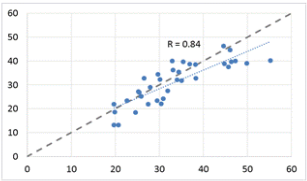
13. _____

Проверка модели для водосбора Чебоксарского водохранилища



Критерий качества	Приток к Чебоксарскому водохранилищу
NS	0,85
BIAS	-2%

Объем притока во II квартале



Макс. расход притока во II кв.

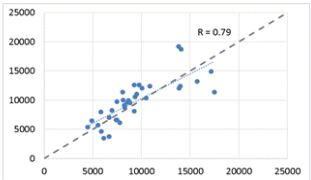
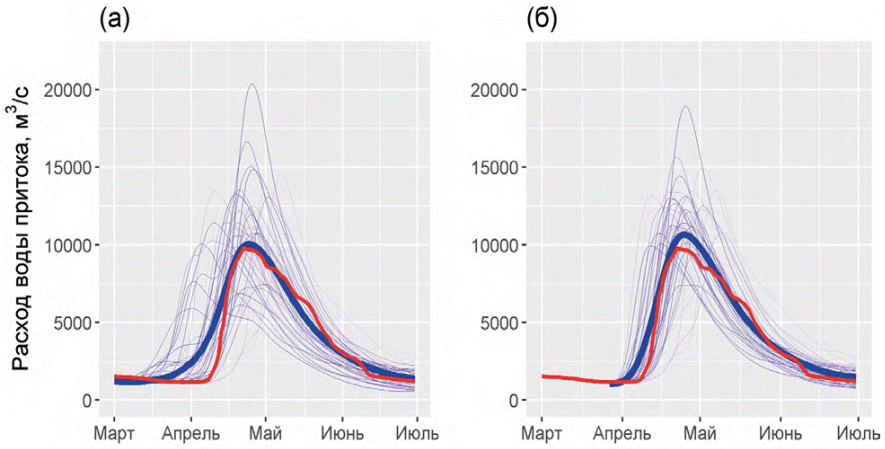


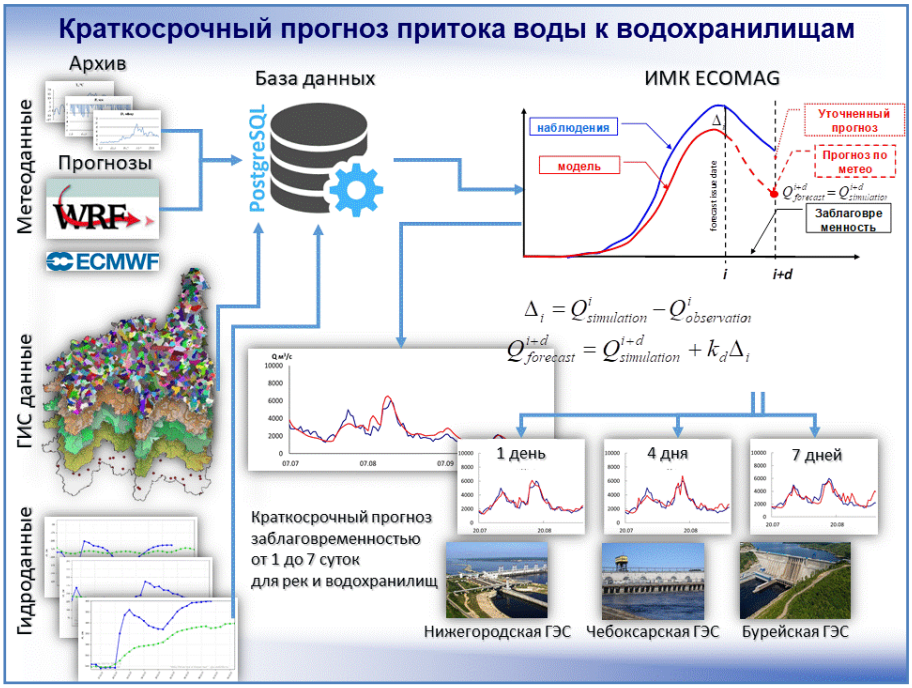
Рис. 3.2. Фактический и рассчитанный по модели гидрографы притока воды к Чебоксарскому водохранилищу.

14. _____

Ансамблевый прогноз притока воды в Чебоксарское водохранилище на 2-й квартал 2018 г.



15. _____



16. _____

Краткосрочный прогноз притока воды к водохранилищам

1. Ежедневно специальный компонент информационно-моделирующей системы обращается к поставщикам гидрометеорологических наблюдений и метеорологических прогнозов по сети Интернет и пополняет и обновляет имеющиеся массивы в базах данных;
2. По разработанным моделям формирования стока по оперативным фактическим метеоданным выполняются расчеты гидрографов притока воды в водохранилища за предшествующий выдаче прогноза период;
3. С использованием краткосрочных метеорологических прогнозов по гидрологическим моделям проводятся прогностические расчеты притока воды в водохранилища с заблаговременностью до 7 дней;
4. Выполняется процедура корректировки результатов прогностических гидрологических расчетов с учетом вновь поступающей гидрометеорологической информации.

17. _____

Краткосрочный прогноз притока воды к водохранилищам
Оперативные испытания
1 сутки
3 суток
7 суток
Нижегородская ГЭС
Q факт
Q прогноз (1 сутки)
Q прогноз (3 суток)
Q прогноз (7 суток)
2018 г.
Чебоксарская ГЭС
2016 г.
Бурейская ГЭС
Фактический
Прогноз

18. _____

Управление водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения - ВКК
Расположение гидроузлов ВКК
Схема принятия решений
Росгидромет
ЦДУ ЕЭС
БВУ РОСВОДРЕСУРСов
Оперативная БД
ECOMAG
Имитационная модель функционирования каскада водохранилищ
Нормативные документы (правила)
РОСВОДРЕСУРСЫ
Заинтересованные ведомства и организации
Минсельхоз
Минэнерго
МЧС
Росгидромет
Росморречфлот
Роспотребнадзор
ОАО «СО ЕЭС»
ОАО «РусГидро»
Предложения по режимам работы
УКАЗАНИЯ
ПРЕДЛОЖЕНИЯ
Типовой график спецпропуска

19. _____

Управление водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения - ВКК
Схема принятия решений
Продольный профиль Волжско-Камского каскада водохранилищ
ОБЩИЙ ОБЪЕМ: 168 км³
ПОЛЕЗНЫЙ ОБЪЕМ: 80 км³
СРЕДНЕГОДОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: 38 млрд. КВтЧ
СУДОХОДНАЯ ГЛУБИНА: 4,0 м
р. КАМА
р. ВОЛГА
Верхневолжский ГУ
Иваньковский ГУ
Угличский ГУ
Рыбинский ГУ
Горьковский ГУ
Чебоксарский ГУ
Куйбышевский ГУ
Саратовский ГУ
Волгоградский ГУ
Нижнекамский ГУ
Воткинский ГУ
Камский ГУ
Каспийское море
Протяженность, км

20. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Управление водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения - ВКК
Схема принятия решений
ОПЕРАТИВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ
Росгидромет
ЦДУ ЕЭС
БВУ РОСВОДРЕСУРСов
Оперативная БД
Текущие проблемы водопользователей
ECOMAG
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ
УКАЗАНИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
Имитационная модель функционирования каскада водохранилищ
Нормативные документы (правила)
Заинтересованные ведомства и организации
Минсельхоз
Минэнерго
МЧС
Росгидромет
Росморречфлот
Роспотребнадзор
...
ОАО «СО ЕЭС»
ОАО «РусГидро»
Предложения по режимам работы
РОСВОДРЕСУРСы
РЕКОМЕНДАЦИИ
ЛПР
Межведомственная оперативная группа
ПРЕДЛОЖЕНИЯ

21. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

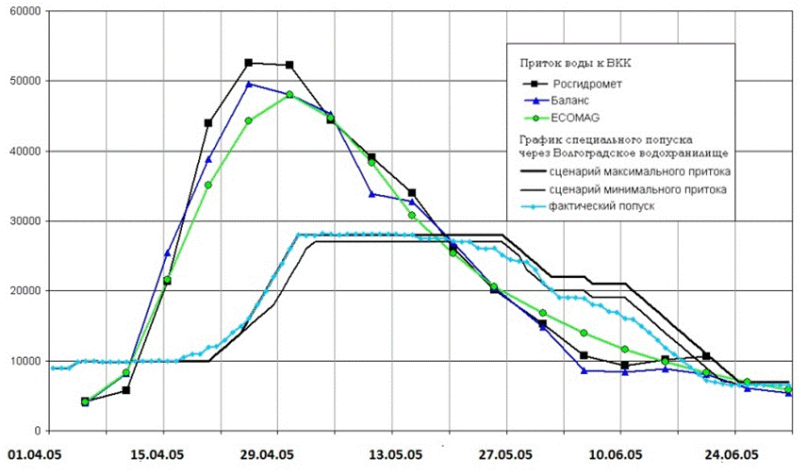
_____

_____

_____

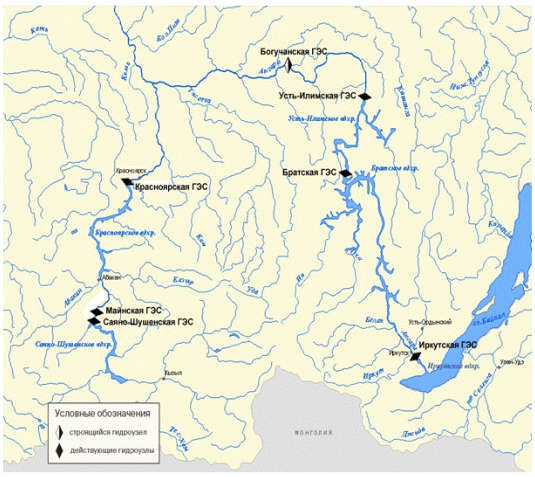
_____

Управление водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения - ВКК



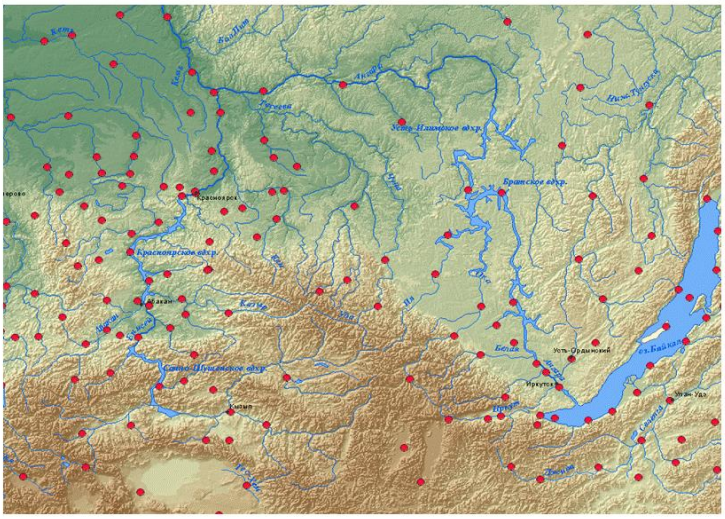
22. _____

Бассейн Енисея
Схема Ангаро-Енисейского каскада



23. _____

Бассейн Енисея
Оперативные метеостанции



24. _____

_____

_____

_____

_____

_____

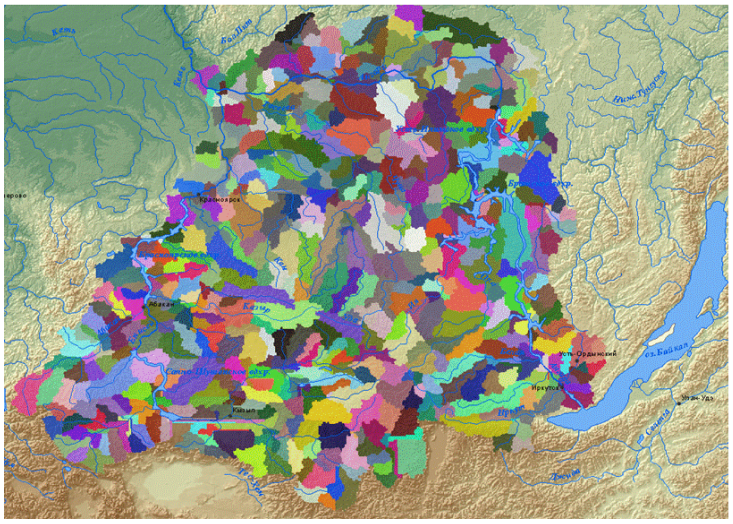
_____

_____

_____

_____

Бассейн Енисея
Расчетные элементы



25. _____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

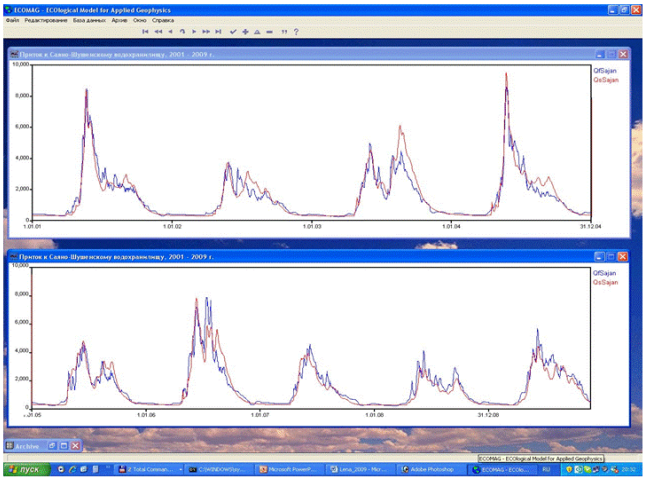
_____

_____

_____

Бассейн Енисея

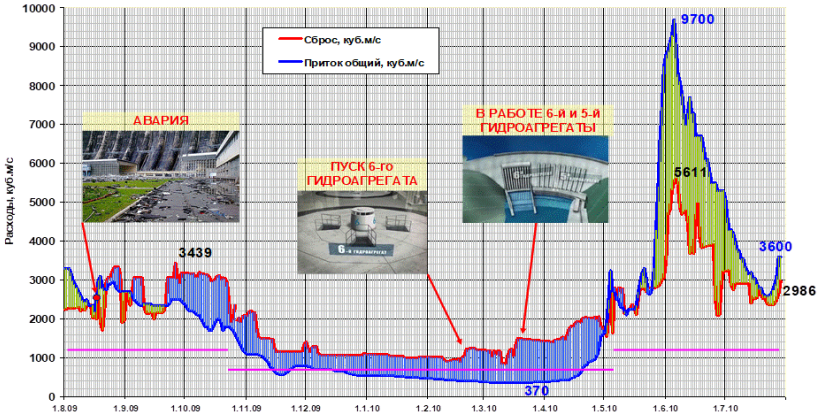
Рассчитанные и фактические гидрографы притока за 2001-2009 г. (Саяно-Шушенское водохранилище, R2=0.89)



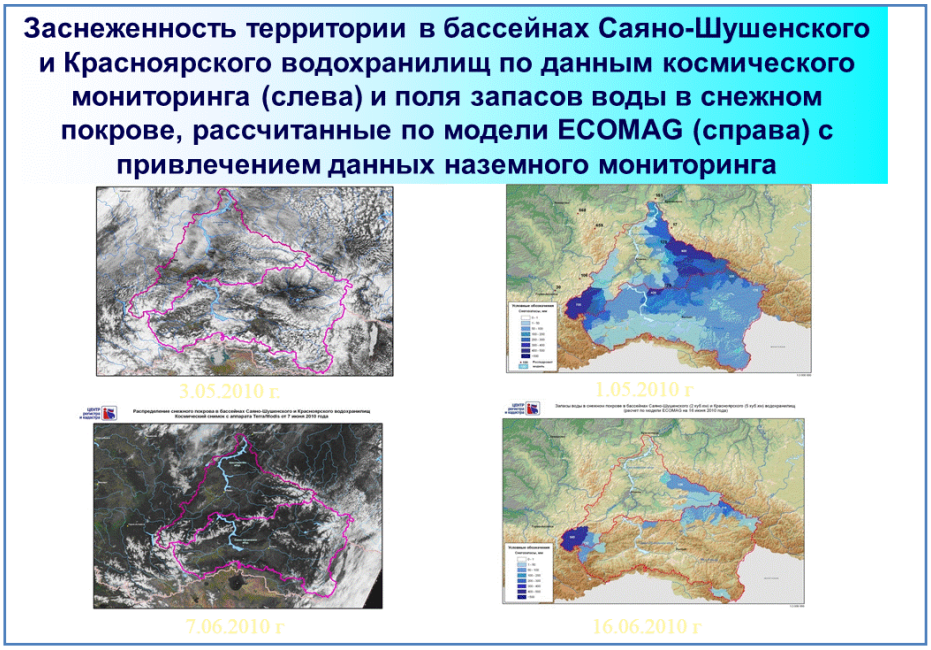
26. _____

Бассейн Енисея

Режим работы Саяно-Шушенского гидроузла после аварии 17.09.2009 г.



27. _____


Заснеженность территории в бассейнах Саяно-Шушенского и Красноярского водохранилищ по данным космического мониторинга (слева) и поля запасов воды в снежном покрове, рассчитанные по модели ECOMAG (справа) с привлечением данных наземного мониторинга
3.05.2010 г.
1.05.2010 г
7.06.2010 г
16.06.2010 г

28. _____

Управление водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения - АЕК
Ангаро-Енисейский каскад
Расчетные водосборы
Оперативные рекомендации по режиму работы Саяно-Шушенской ГЭС после аварии 17 августа 2009 года
Сброс, куб.м/с
Приток общий, куб.м/с
Расходы, куб.м/с
АВАРИЯ
ПУСК 6-го ГИДРОАГРЕГАТА
В РАБОТЕ 6-й и 5-й ГИДРОАГРЕГАТЫ
9700
5611
3600
3439
2986
370
Космический мониторинг
Ситуация под контролем

29. _____

Контрольные вопросы по лекции 6.

6.1 Назовите основные источники неопределенности оценок гидрологических последствий изменений климата в 21 веке.

6.2 На основе каких входных данных строится ансамблевый долгосрочный прогноз водного режима рек?

6.3 В чем заключается главная задача Волжско-Камского каскада водохранилищ с гидроэлектростанциями?

Ответы к контрольным вопросам по лекциям.

Вопрос 1.1. Почему речной бассейн можно рассматривать как квазидвумерную систему?

Ответ: Потому что характерные вертикальные размеры элементов гидрологической системы на несколько порядков меньше их горизонтальных размеров.

Вопрос 1.2. Почему речной бассейн рассматривается как эволюционирующая система с переменными параметрами?

Ответ: Потому что физические свойства речного бассейна являются следствием взаимосвязанной эволюции форм рельефа, почв, ландшафтов, климата и антропогенной деятельности.

Вопрос 1.3. Перечислите основные процессы формирования стока на речном водосборе.

Ответ: Формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвы, впитывание воды в талую и мерзлую почву, эвапотранспирация, движение воды по поверхности склонов, почвенным и грунтовым стоком, в речных руслах.

Вопрос 2.1. Назовите типы детерминированных гидрологических моделей.

Ответ: модели черного ящика, концептуальные, физико-математические.

Вопрос 2.2. Назовите почвенно-гидрологические константы, разделяющие классы подвижности почвенной влаги.

Ответ: Максимальная гигроскопичность (неподвижная влага, сорбированная на поверхности почвенных частиц); наименьшая полевая влагоемкость (влага передвигается в виде водных пленок под действием капиллярных сил; полная влагоемкость (влага дренируется в более глубокие слои под действием сил гравитации).

Вопрос 2.3. Что такое эффективные параметры модели?

Ответ: Это параметры усредненных по площади уравнений.

Вопрос 3.1. Какие картографические данные и функция ГИС-технологии задействуются для гидрографического моделирования и пространственной схематизации речного бассейна в ИМК ECOMAG?
Ответ: Анализ линий тока на цифровых моделях рельефа (ЦМР).

Вопрос 3.2. Какие типы пространственной схематизации речных бассейнов используются в физико-математических моделях?
Ответ: Равномерная прямоугольная сетка, конечноэлементная схематизация, разбиение на элементарные водосборы.

Вопрос 3.3. Какая классификация речной сети используется в ИМК ECOMAG?
Ответ: Классификация по Шрайберу.

Вопрос 4.1. К какому типу моделей относится модель ECOMAG?
Ответ: ECOMAG - физико-математическая модель с полураспределенными параметрами.

Вопрос 4.2. Что включает в себя информационное обеспечение комплекса ECOMAG?
Ответ: Картографическое обеспечение (цифровые карты рельефа, почв и растительности), гидрометеорологическое обеспечение (метеорологическая, гидрометрическая и водохозяйственная информация с суточным разрешением, пентадные наблюдения за характеристиками снежного покрова и промерзанием почвы).

Вопрос 4.3. Какой тип калибровки модели использован в ИМК ECOMAG?
Ответ: Ручная калибровка.

Вопрос 5.1. Какие статистические критерии соответствия фактических и рассчитанных гидрографов стока наиболее часто используются в гидрологических моделях?
Ответ: Критерии Нэша-Сатклифа, s/σ, BIAS.

Вопрос 5.2. С чем связана проблема эквифинальности гидрологических моделей?

Ответ: С недостатком данных гидрометеорологического мониторинга для калибровки параметров и валидации моделей.

Вопрос 5.3. Назовите минимальные и максимальные размеры расчетных (элементарных) водосборов модель ECOMAG для речных бассейнов в Европейской части России.

Ответ: Минимальные размеры – 1 км^2, максимальные – 12000 км^2.

Вопрос 6.1. Назовите основные источники неопределенности оценок гидрологических последствий изменений климата в 21 веке.

Ответ: Гидрологические модели, климатические модели, сценарии глобального развития. Основной источник неопределенностей оценок связан с климатическими моделями.

Вопрос 6.2. На основе каких входных данных строится ансамблевый долгосрочный прогноз водного режима рек?

Ответ: На основе сценариев погоды, наблюдавшихся в период заблаговременности прогноза за период метеорологических наблюдений.

Вопрос 6.3. В чем заключается главная задача Волжско-Камского каскада водохранилищ с гидроэлектростанциями?

Ответ: Главной задачей каскада является перераспределение во времени крайне неравномерно распределенного внутри года естественного стока р. Волги.