



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова



Доклад:

«Разработка параметризации речного стока и термического режима для модели Земной системы ИВМ РАН»

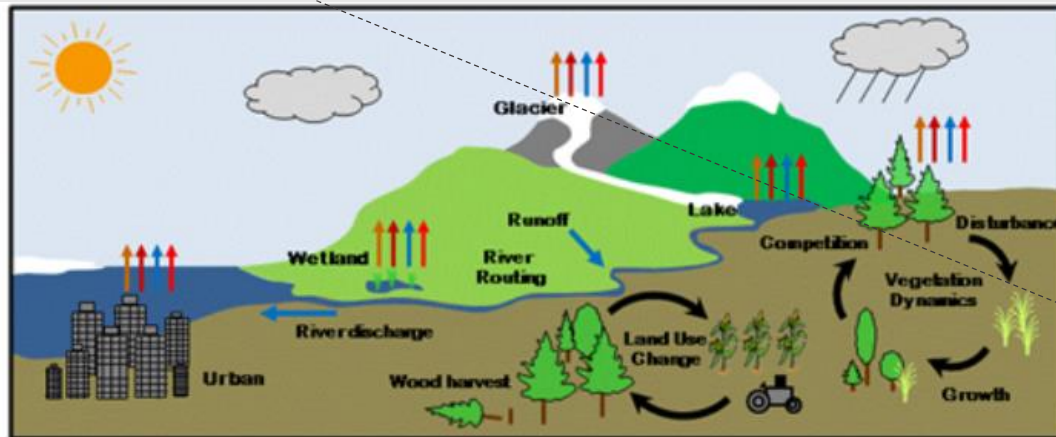
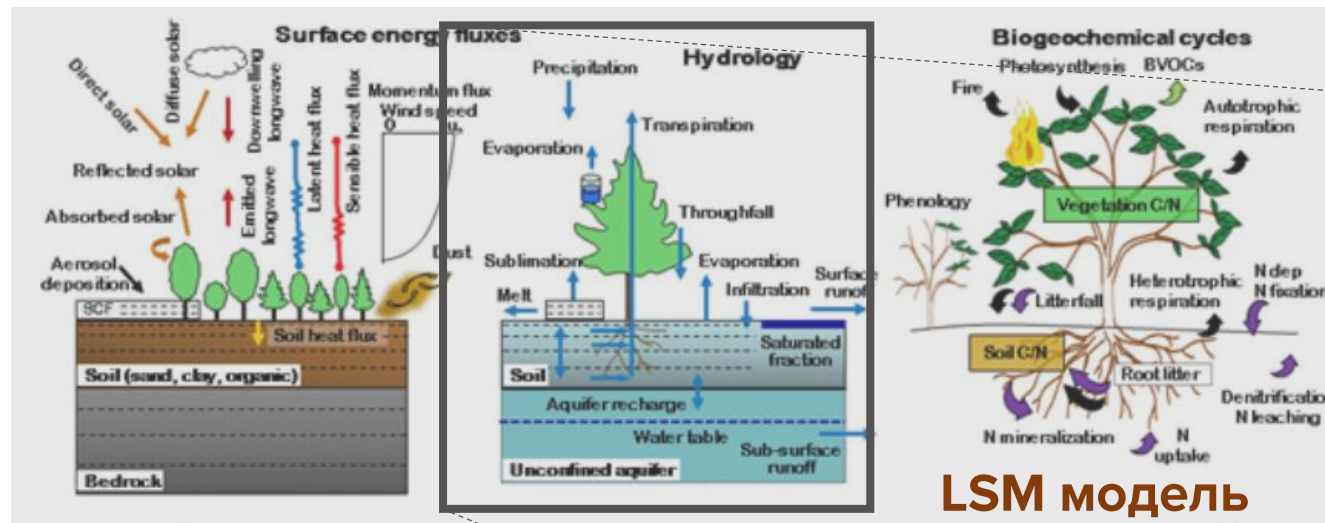
Авторы:

¹**Корпушенков И. А.**, студент 1-го курса магистратуры кафедры *гидрологии суши* МГУ

²**Степаненко В. М.**, к.ф. – м. н, ведущий научный сотрудник НИВЦ МГУ

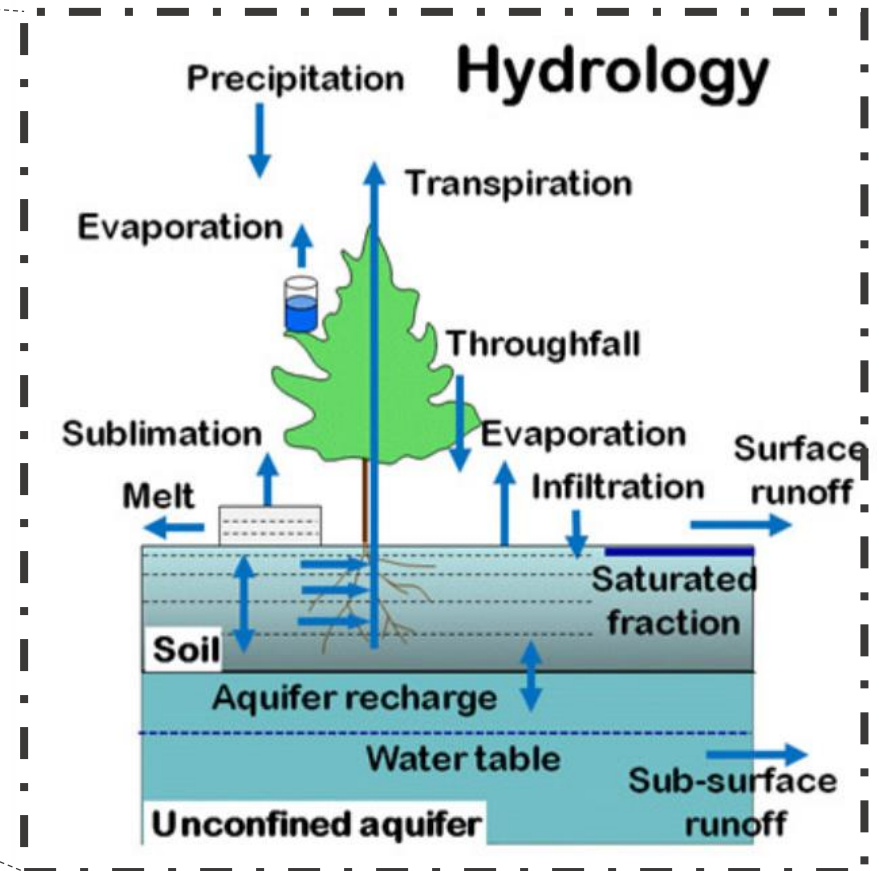
6 июля 2018 г.
г. Томск, ИМКЭС СО РАН

Гидрологический цикл в моделях Земной системы



Гидрометеорологические процессы суши

Гидрологический блок в LSM



*источник: cesm.ucar.edu/models/clm/

Таблица 1. Параметризации речной сети в моделях Земной системы, участвующих в CMIP5

Страна	Франция	Великобритания	Франция	США	Япония	Германия	Россия
Разработчики	CNRM-CERFACS	MOHC	IPSL	NCAR	MIROC	MPI-M	INM RAS
Модель Земной системы	CNRM-CM5	HadGEM2-ESM	IPSL-CM5A-LR	NCAR CCSM4	MIROC-ESM	MPI-ESM	INM-CM4
Модель деятельного слоя	SURFEX + TRIP	JULES (Joint UK Land Environment Simulator) + TRIP	ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms)	CLM (Community land model)	MATSIRO	JSBACH	INM
Маршрутизация речного стока	TRIP [6]	TRIP [6]	Bucket based	SIMTOP [5]	TRIP [6]	HD model [4]	В разработке
Описание	уравнение кинематической волны (1D)	уравнение кинематической волны (1D)	линейная емкостная модель (каскад емкостей)	линейная емкостная модель (каскад емкостей)	уравнение кинематической волны (1D)	-	-

*таблица составлена автором доклада по данным сайта cmip.llnl.gov/cmip5 и публикаций [Hagemann, 2003], [Niu et al, 2005], [Oki, T. , 1998]

Классические гидрологические модели



MIKE11 (Denmark)

mikepoweredbydhi.com



SOBEK Suite (Netherlands)

deltares.nl



ECOMAG (Russia)

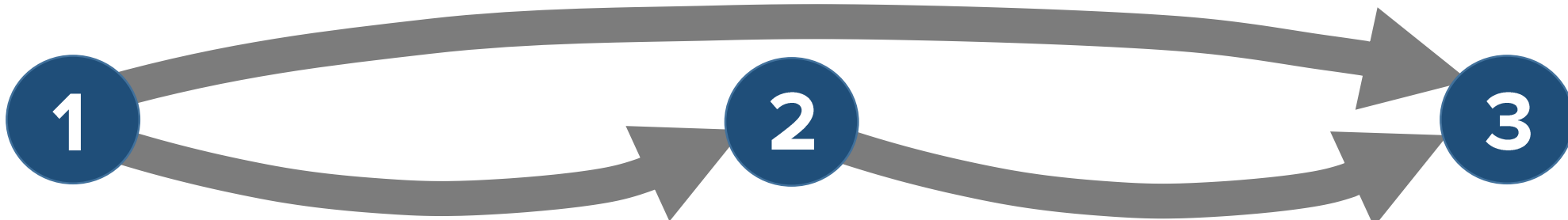
iwp.ru



CE-QUAL-W2 (USA)

cee.pdx.edu/w2/

Ключевые недостатки



Используют уравнения
мелкой воды (одно-
или двумерные)

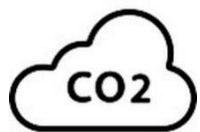
Высокие требования к
информационному
обеспечению

Не могут быть встроены в
архитектуру климатических
моделей

Мотивации для включения рек в ESM

1

Значительное влияние на углеродный цикл, большой вклад в парниковый эффект



$1.8 \text{ PgC yr}^{-1} \sim 1.8 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$

соответствует 1/5 от объема сжигаемого ископаемого топлива

CH_4

$104 \text{ Tg yr}^{-1} \sim 1.04 \cdot 10^{14} \text{ г/год}$

соответствует 50% от глобальной эмиссии с болот

Global extent of rivers and streams

George H. Allen*† and Tamlin M. Pavelsky

Department of Geological Sciences, University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA.

*Present address: Department of Geography, Texas A&M University, College Station, TX, USA.

Science

[Rivers and streams are a major source of greenhouse gas](#) emissions, so the significantly higher river and stream surface area calculation has important implications for understanding carbon emissions.

*по данным: [Travnik et al., 2009], [Hotchkiss et al. , 2015], [Allen et al. 2018], [Raymond et al., 2013], [IPCC, 2013]

Мотивации для включения рек в ESM

2

Сильное влияние на термохалинную циркуляцию в океанах

р. Конго

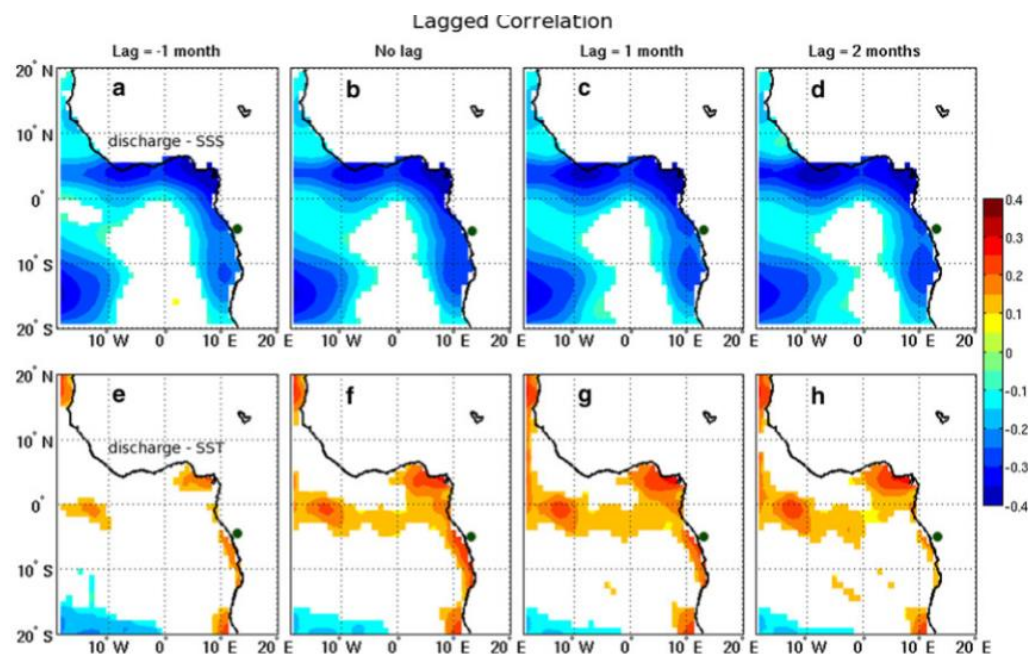
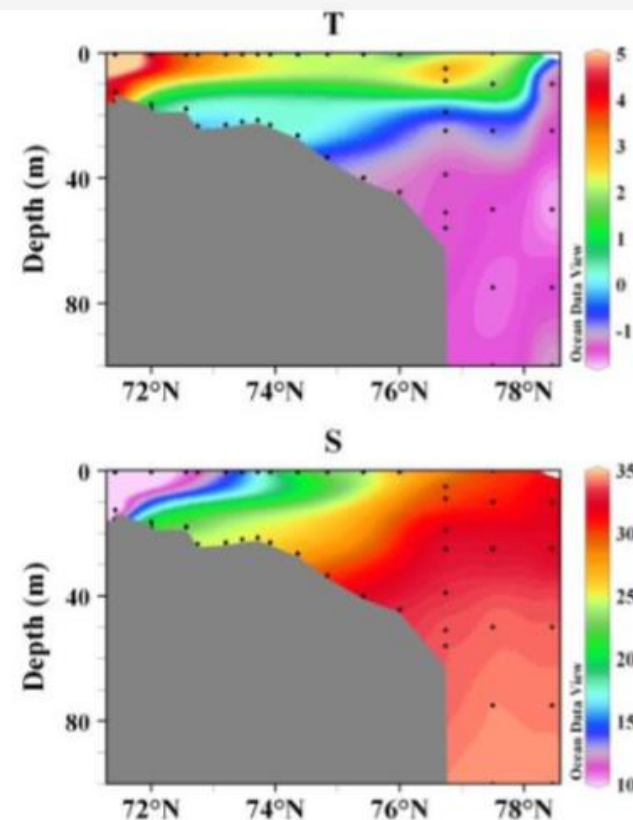


Fig. 5 Correlation between river discharge and SSS (*top panel*) and river discharge and SST (*bottom panel*). Shaded values are significant at the 95 % confidence level (*t* test)

р. Лена



Vertical distribution of temperature (T, °C), S,

*по данным: [Materia et al., 2012], [Semiletov et al., 2011]

Мотивации для включения рек в ESM

3

Сток рек – наиболее точно измеряемая компонента водного баланса суши

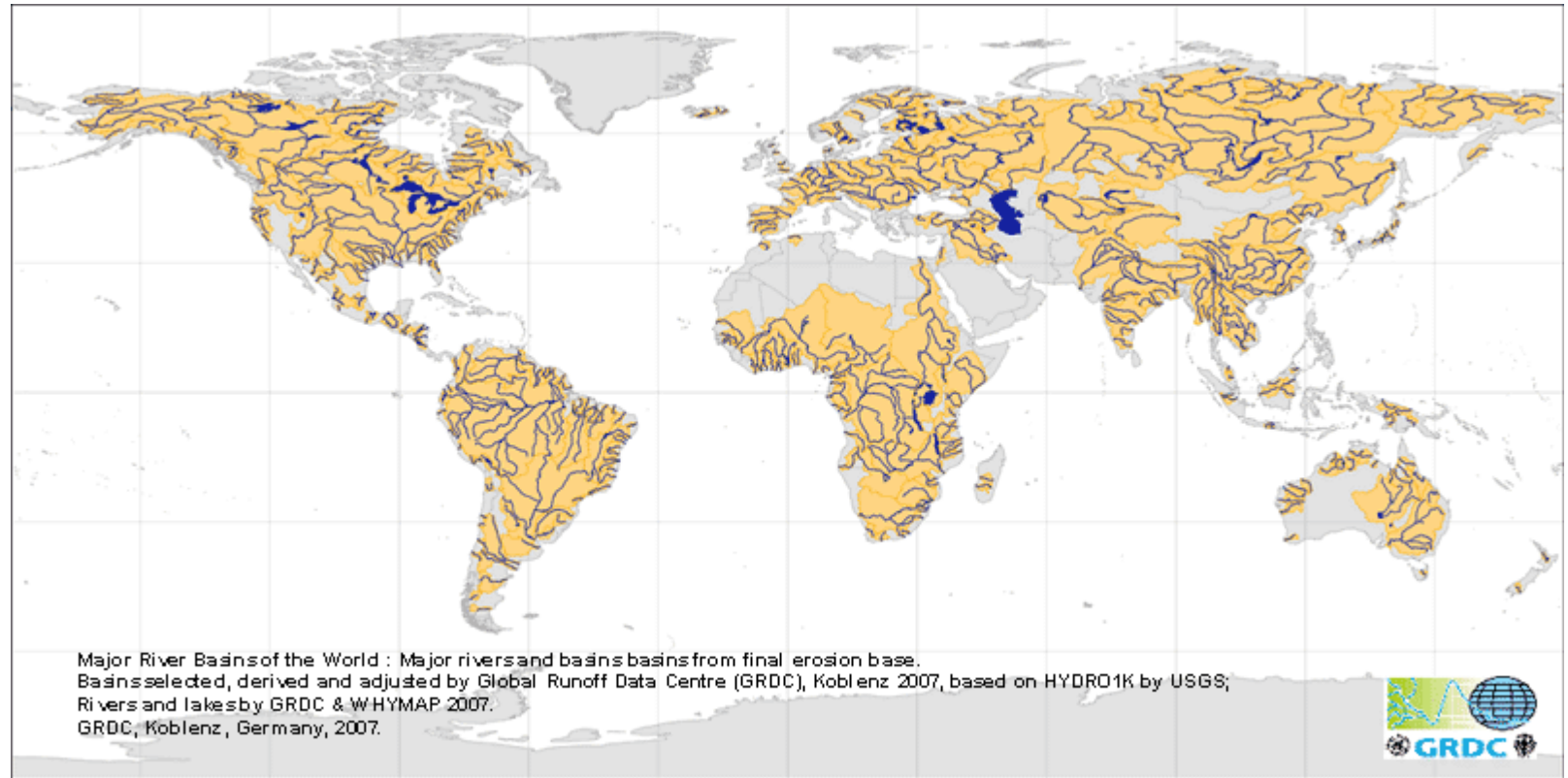
Климатический сток

$$y = x - z$$

Сток (мм)

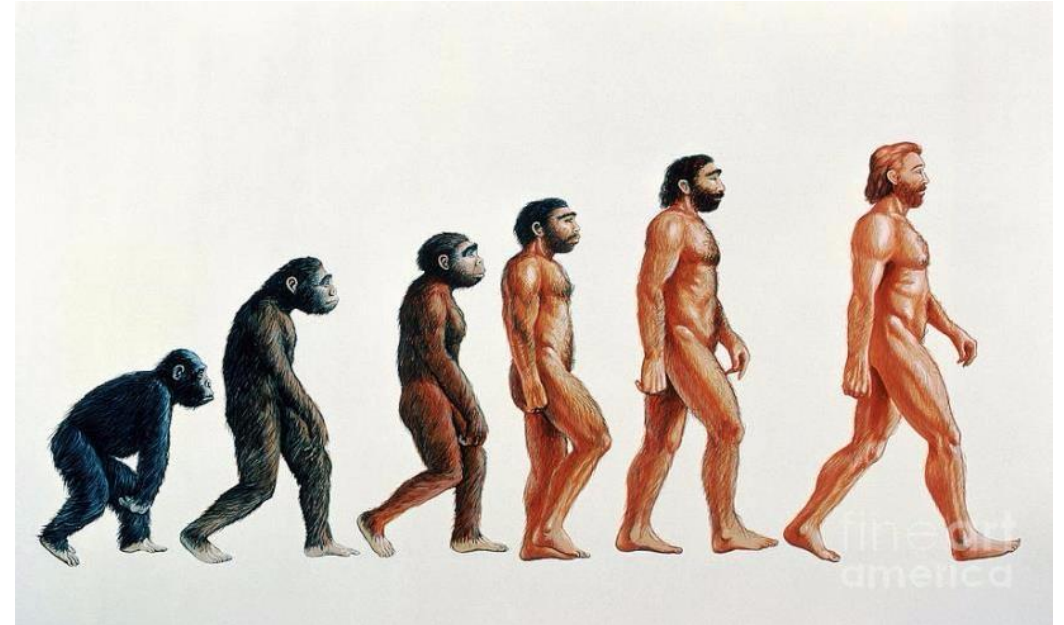
Испарение (мм)

Осадки (мм)



*по данным: bafg.de/GRDC

Мотивации для включения рек



Математическая модель «RIVERFLOW1D»

Задача: описать процессы стока воды в русле равнинной реки.

Допущения:

1. Не описывается сток наносов, морфодинамические процессы, биогеохимические процессы, “сложные русла”;
2. Используется математический аппарат **уравнения кинематической волны**;
3. Уклон дна считается постоянным по всей длине;
4. Форма русла является призматической (в сечении *трапецеидальное*, угол откоса принят за 30°)

В модели реализовано решение следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \\ v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \\ h = f^{-1}(S) \end{cases}$$

Q – расход воды (м³/с), S – площадь поперечного сечения,

v – скорость течения (м/с), h – глубина (м)

n – коэффициент шероховатости Маннинга,

R – гидравлический радиус (м), i – геометрический уклон,

f – функция, связывающая между собой S и h

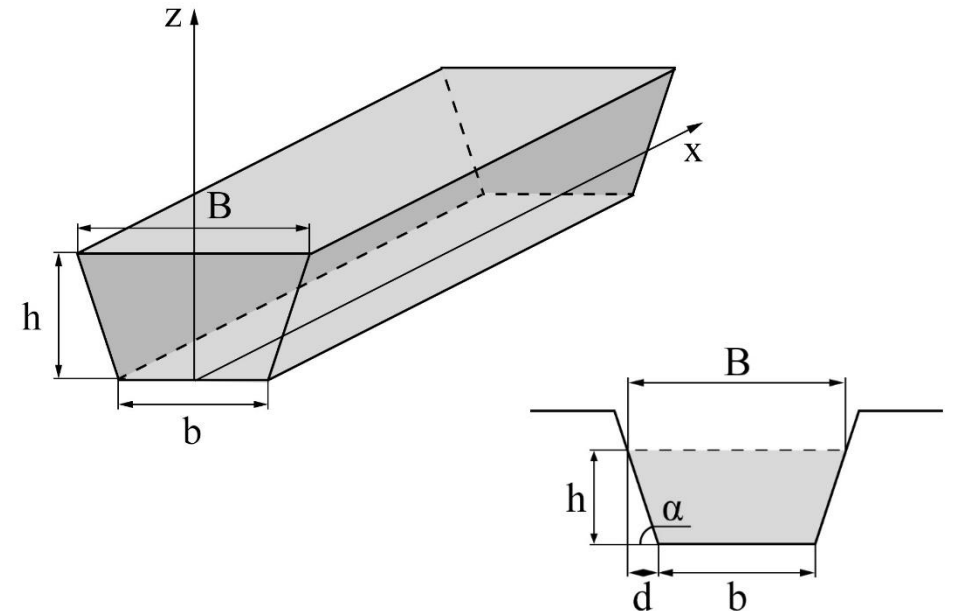
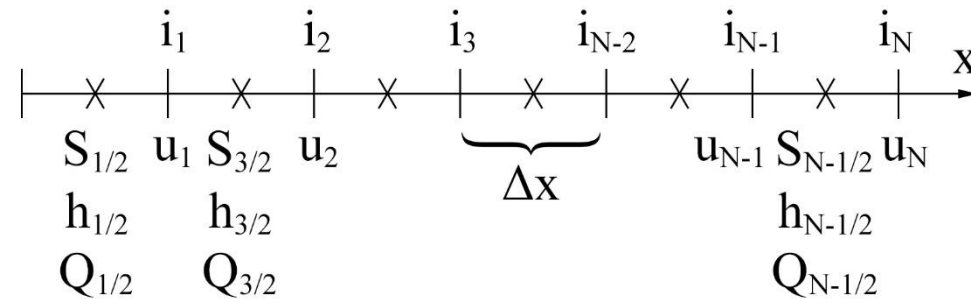


Рис. Параметризация русла

Конечно-разностная сетка модели



Аппроксимация производных на **сдвинутой** сетке

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$



$$\frac{S_{j+1/2}^{i+1} - S_{j+1/2}^i}{\Delta t} + \frac{(Su)_{j+1}^i - (Su)_j^i}{\Delta x} = 0$$

Формула Шези-Маннинга

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i}$$



$$u_{j+1}^i = \frac{1}{n_{j+1}} \left(\frac{R_{j+1/2} + R_{j+3/2}}{2} \right)^{2/3} \sqrt{i_{j+1}}$$

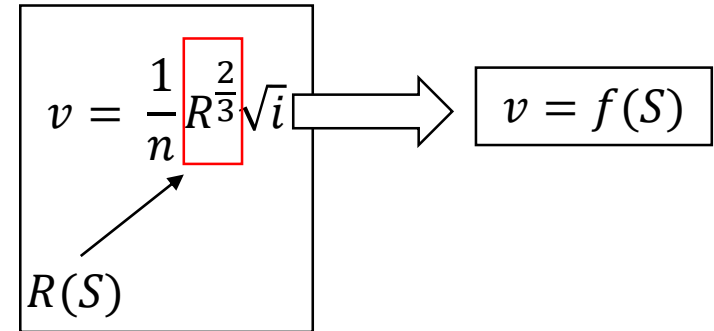
Особенности численной реализации «RIVERFLOW1D»

Проблема:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \\ v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \\ h = f^{-1}(S) \end{cases}$$

- Система имеет высокую нелинейность, поскольку:

Нелинейное дифференциальное уравнение


$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \Rightarrow v = f(S)$$

$$\frac{\partial(Sv)}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

- слагаемое, отвечающее за сильную вычислительную неустойчивость – **решение не сходится!**

Решение:

- 1) Построение неявной схемы;
- 2) Фильтрация расчетных полей;
- 3) **Пространственное осреднение**

Осреднение гидравлического радиуса R

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} R_i}{N-1}$$

,где N – количество расчетных узлов.

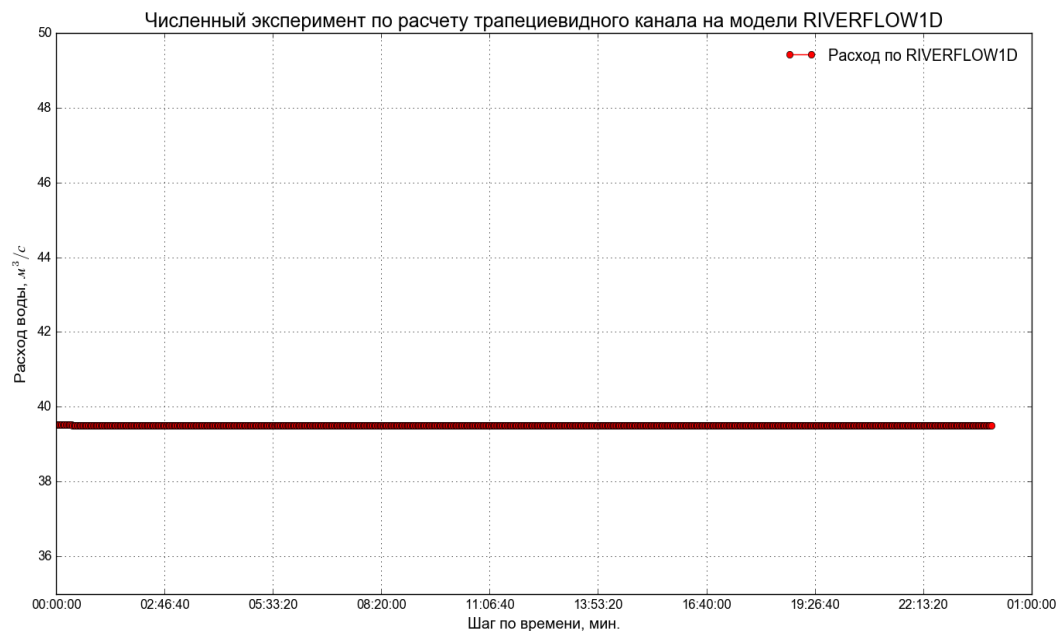


Главные ограничения связаны с использованием аппарата **равномерного движения** (уравнение кинематической волны): расчет возможен только при числе Фруда $Fr = \frac{v^2}{gh} \leq 1$ (равнинные реки).

- 1) Расчет производится только в безледный период;
- 2) Не учитываются возможные эффекты от высокого содержания взвешенных наносов;
- 3) Не поддерживается расчет на горных реках
- 4) Возможны неточности при моделировании неустоившегося движения (половодья, паводки) из-за несовершенства алгоритма оптимизации *коэффициента шероховатости Маннинга n*

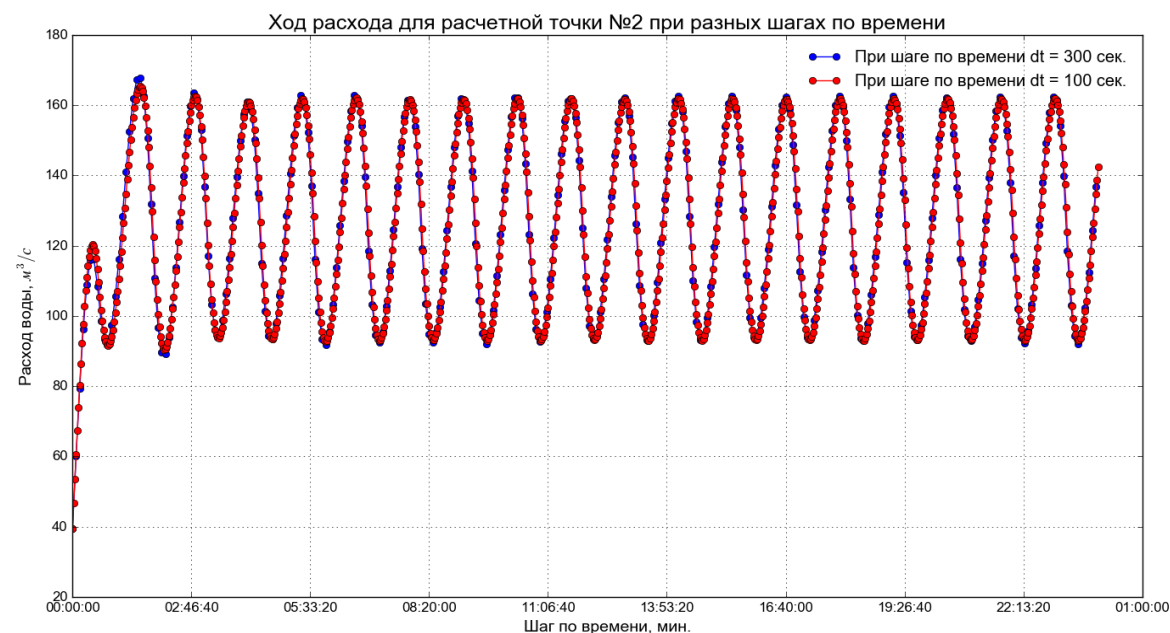
Численные эксперименты

№1. Фиксированные значения начальных и граничных условия



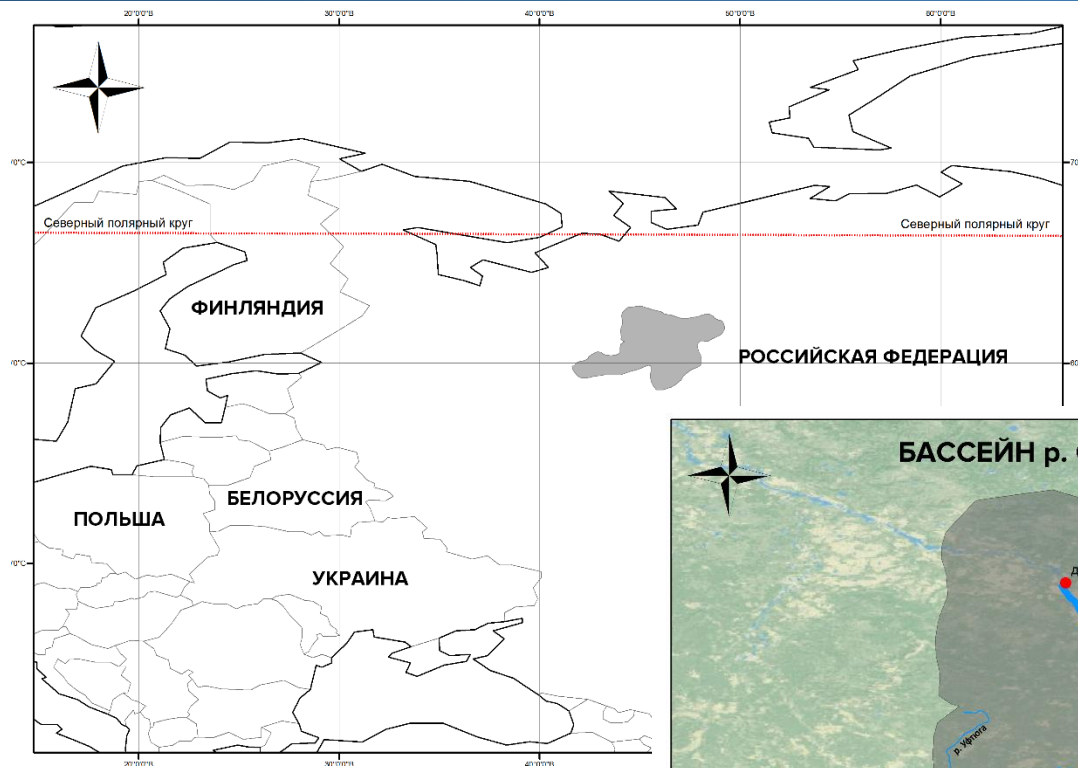
Проверка модели на работоспособность

№2. Граничное условие задано **аналитически** при разных значениях шага по времени dt



Согласование шагов по времени. Проверка схемы по критерию Куранта

Верификация модели «RIVERFLOW1D»



Карта-схема моделируемого участка реки

Гидрографические параметры:

- Площадь бассейна (F) – 357000 км²;
- Длина моделируемого участка – 470 км

По классификации М. И. Львовича:
преимущественно снеговое питание

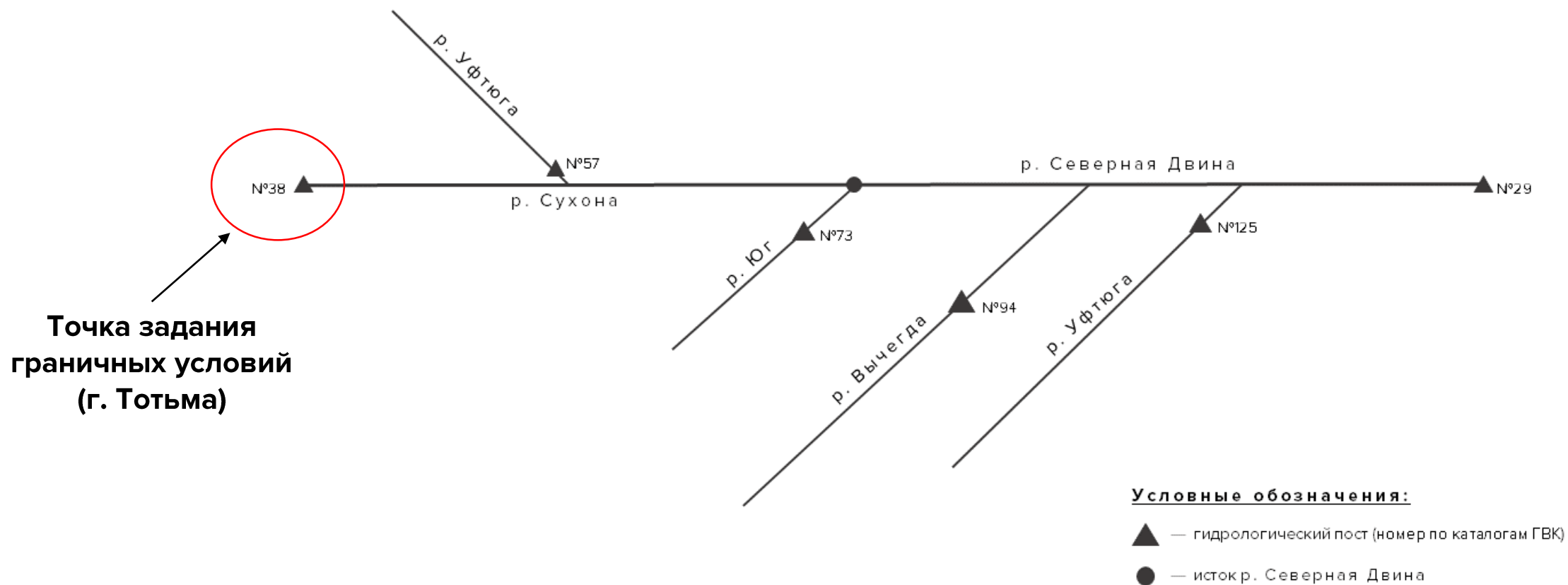
По классификации Б. Д. Зайкова:
с весенним половодьем, восточно-европейский тип

Особенности:

- Низкое антропогенное влияние на участке реки;
- Доступна информация о стоке воды

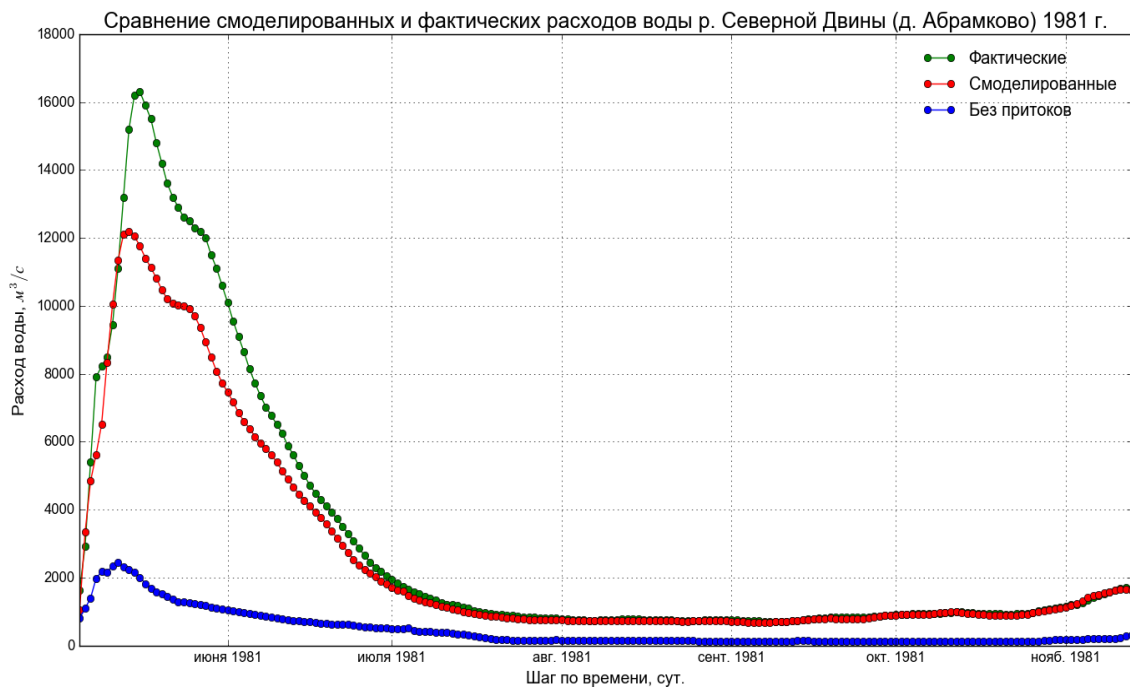
Верификация модели «RIVERFLOW1D»

Схема моделируемого участка
(система р. Сухона – р. Северная Двина)



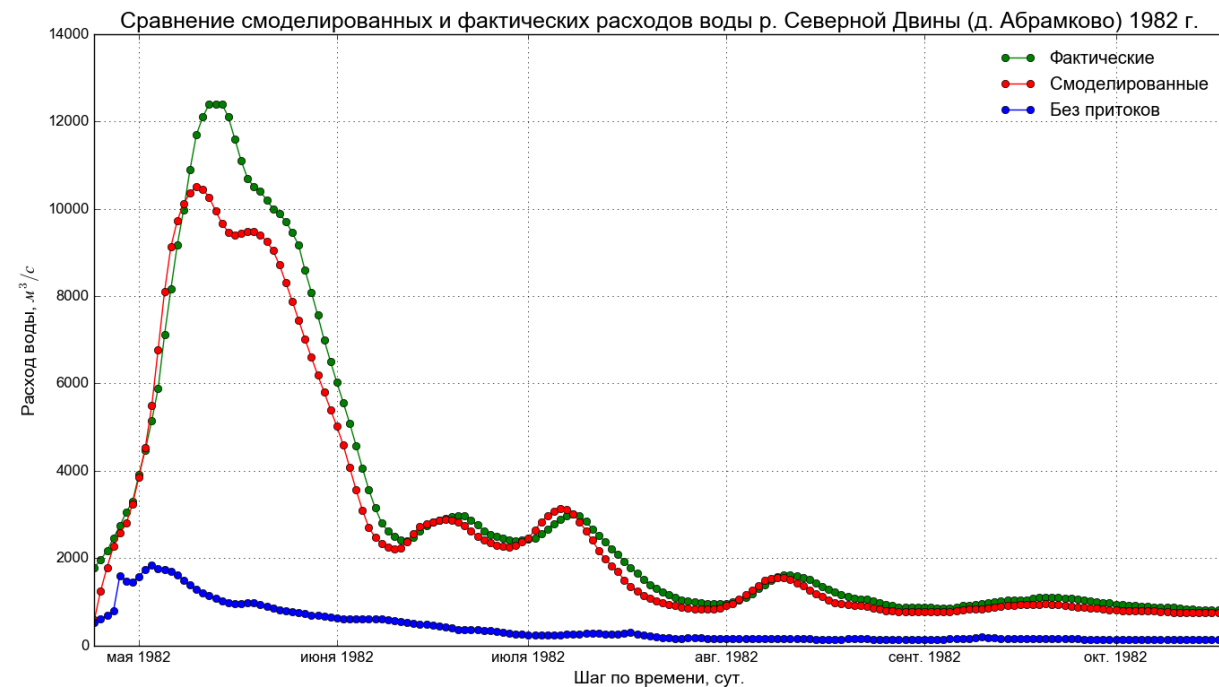
Верификация модели «RIVERFLOW1D»

Моделирование расходов воды р. Северная Двина на участке г. Тотьма – д. Абрамково



1981 г.

- Фактические
- Смоделированные
- Без притоков

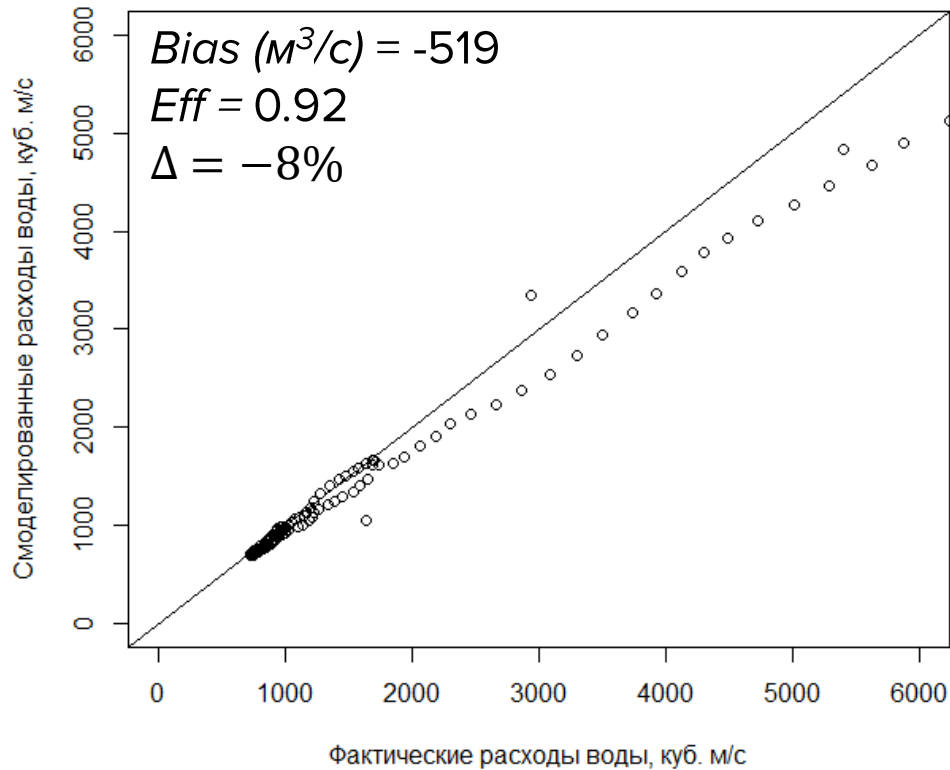


1982 г.

Моделирование расходов на участке равнинной реки

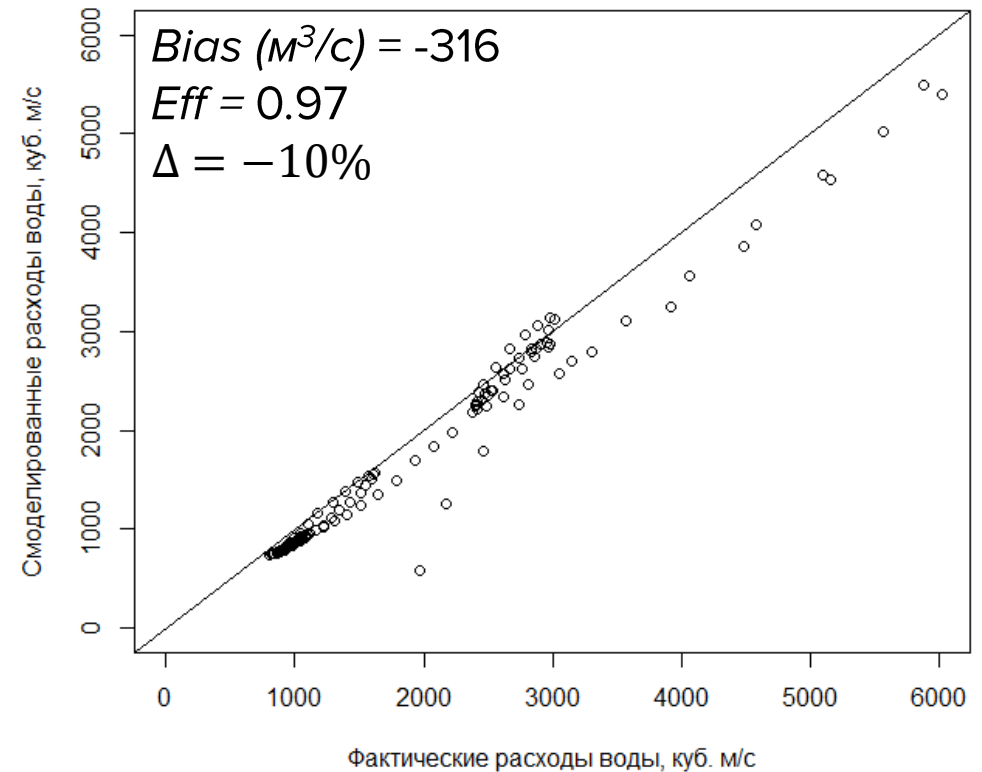
Сопоставление фактических и смоделированных расходов воды р. Северная Двина

Сопоставление расходов воды в 1981 г. (р. Северная Двина)



1981 г.

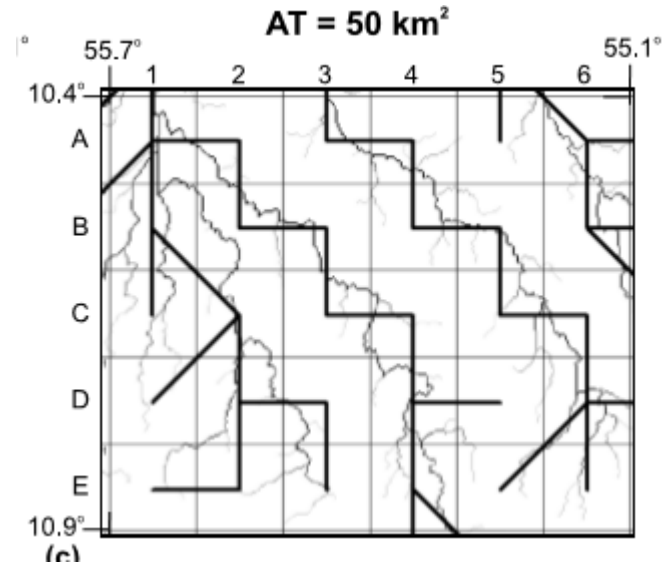
Сопоставление расходов воды в 1982 г. (р. Северная Двина)



1982 г.

Маршрутизация стока рек в моделях климата (теория)

Грубое представление в виде перетекания из ячейки в ячейку



Paz. et al, 2006

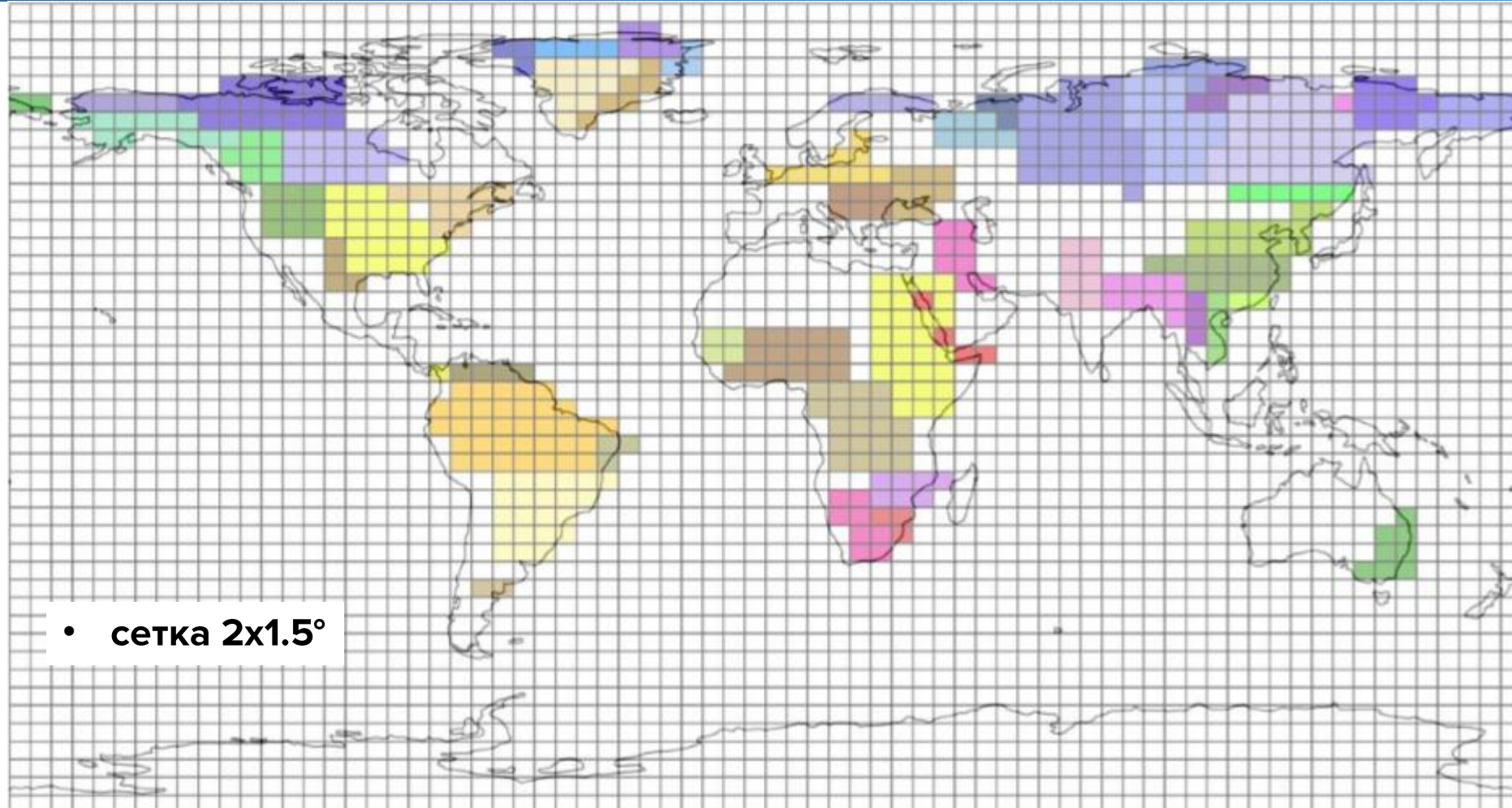
Основа для базовых методов – это ЦМР (высота рельефа) – с очень высоким разрешением или базы полей направлений. Делают огрубление.

Основной метод определения направление стока в моделях: метод наибольшего градиента

39	38 ↑	45
44	72	46
56	57	57

Всего 9 направлений (D8)

Маршрутизация стока рек в модели ИВМ РАН (var. 1)

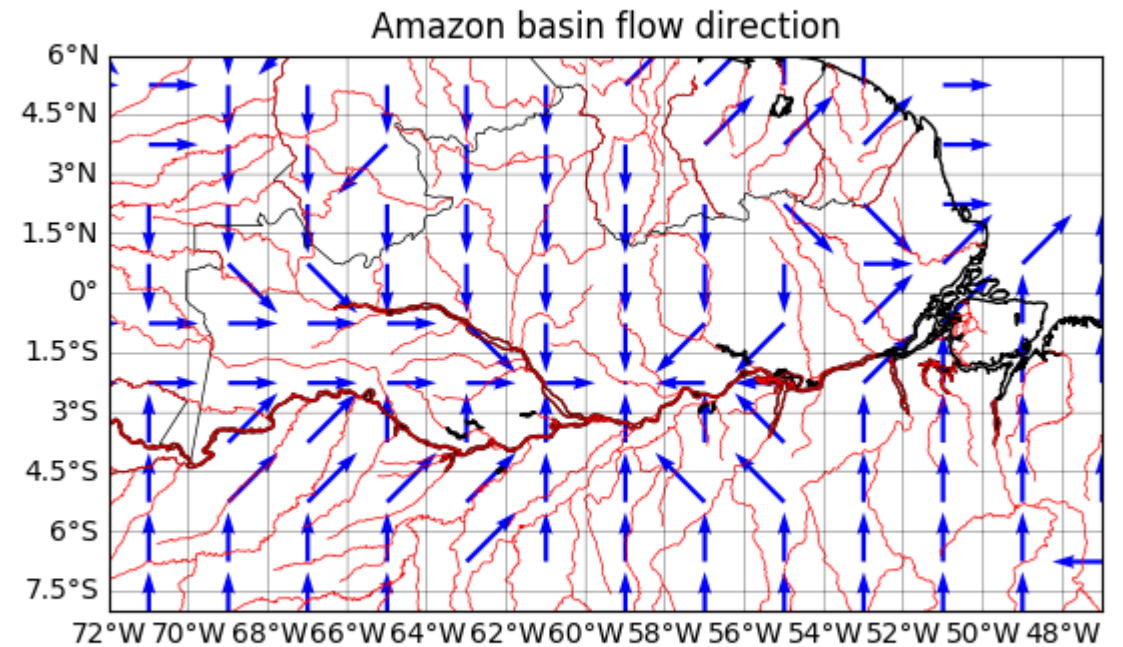
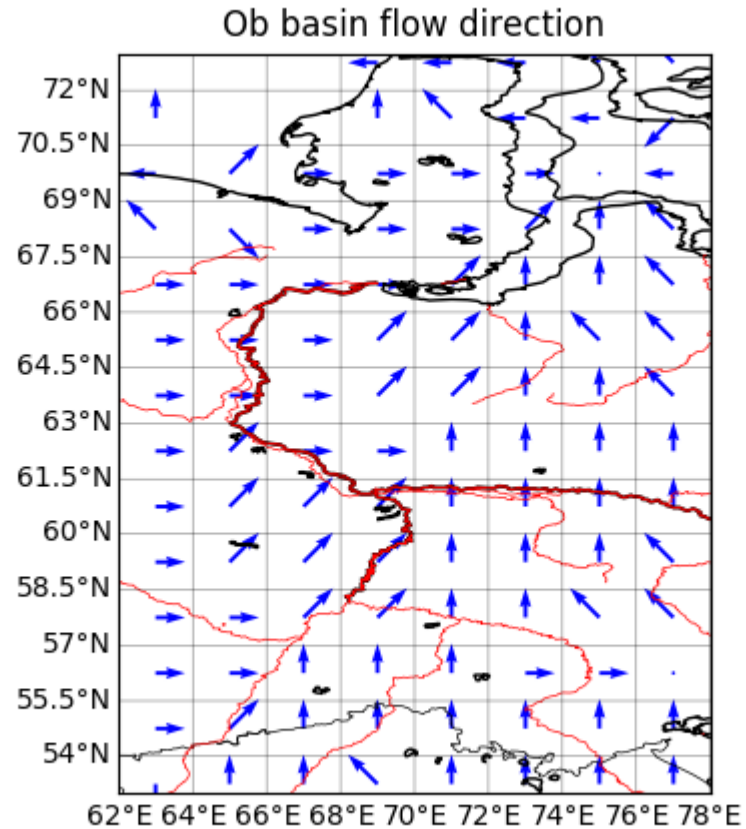


Особенности:

- 54 крупных речных бассейна бассейна
- Суммирование и мгновенный сброс в океан

Маршрутизация стока рек

Метод наибольшего градиента при огрублении **даёт серьезные ошибки**



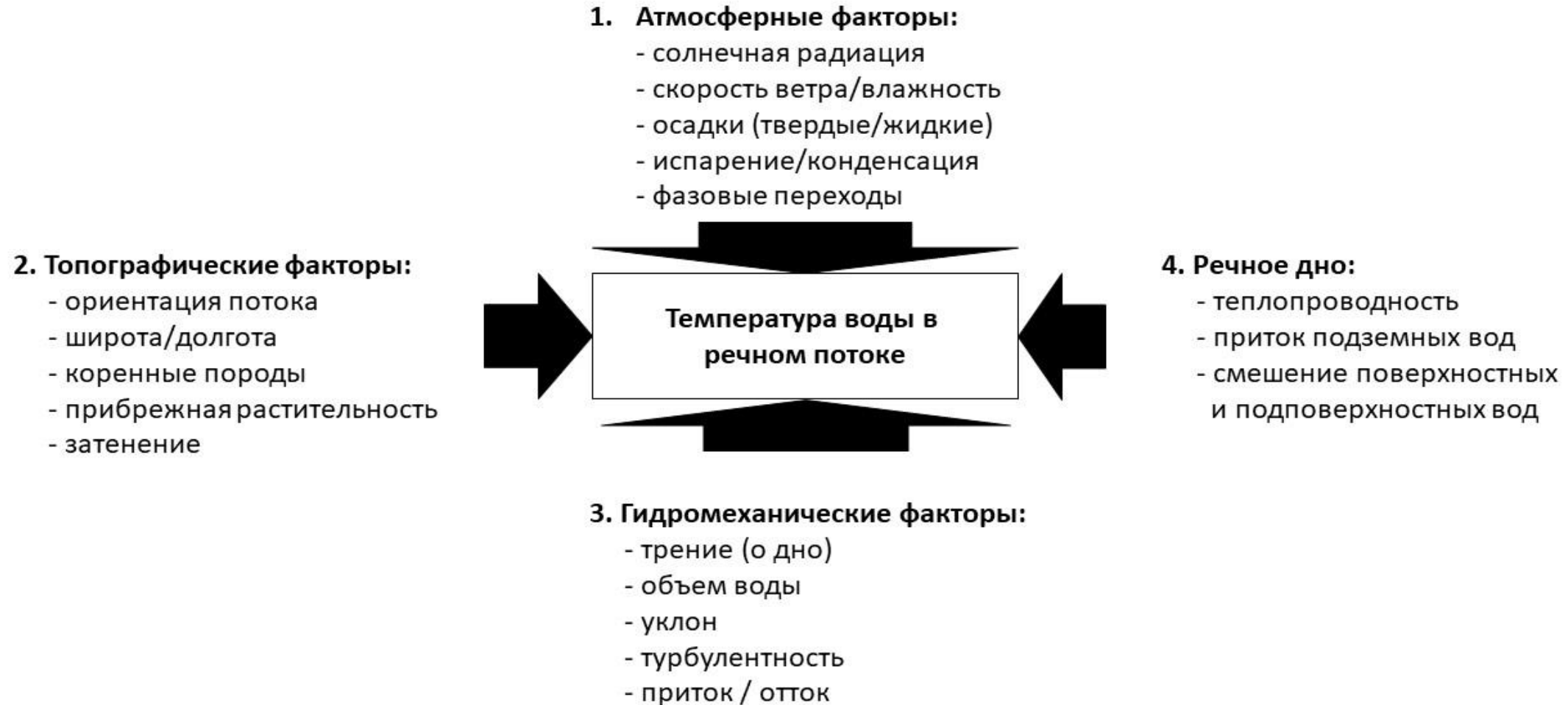
Принятые допущения:

1. Перемешивание по всему поперечному сечению и по глубине
2. Незначительная дисперсия температуры по длине реки

Рассматриваем горизонтальный перенос
+
процессы теплообмена с атмосферой

Термический режим рек (факторы)

Факторы, влияющие на температуру воды в реке



Пространственно-временная изменчивость

Пространственная

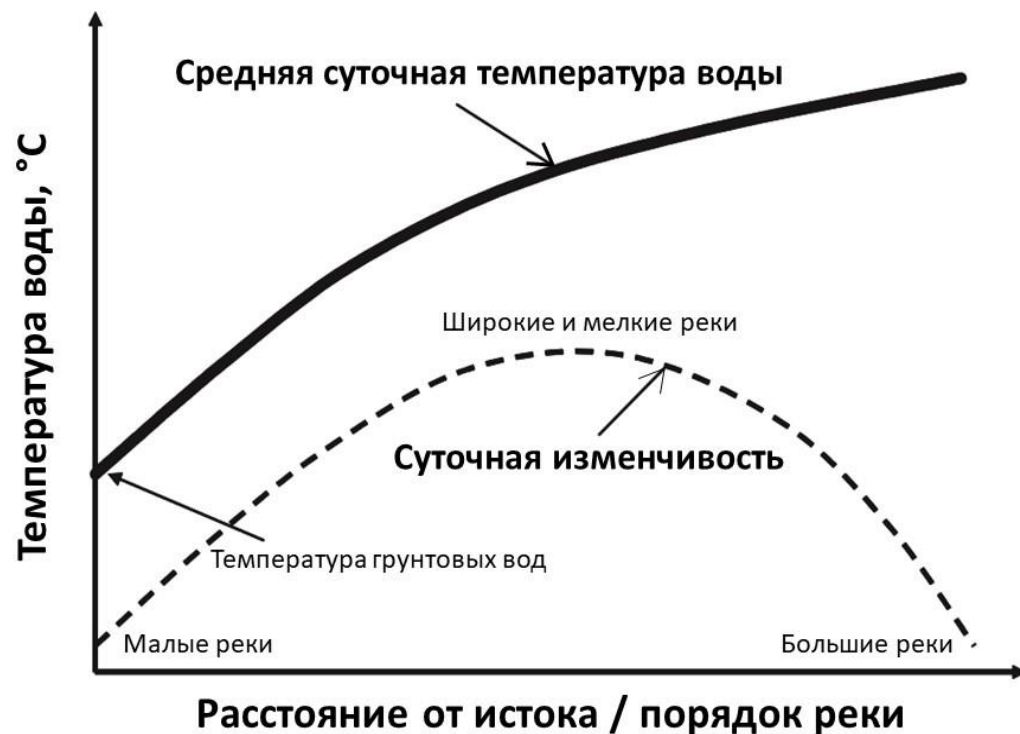


Рис. Среднесуточная (по длине реки) и внутрисуточная (по времени) изменчивость температуры воды в реках. Адаптировано автором из работы [Caissie, 2006].

Временная

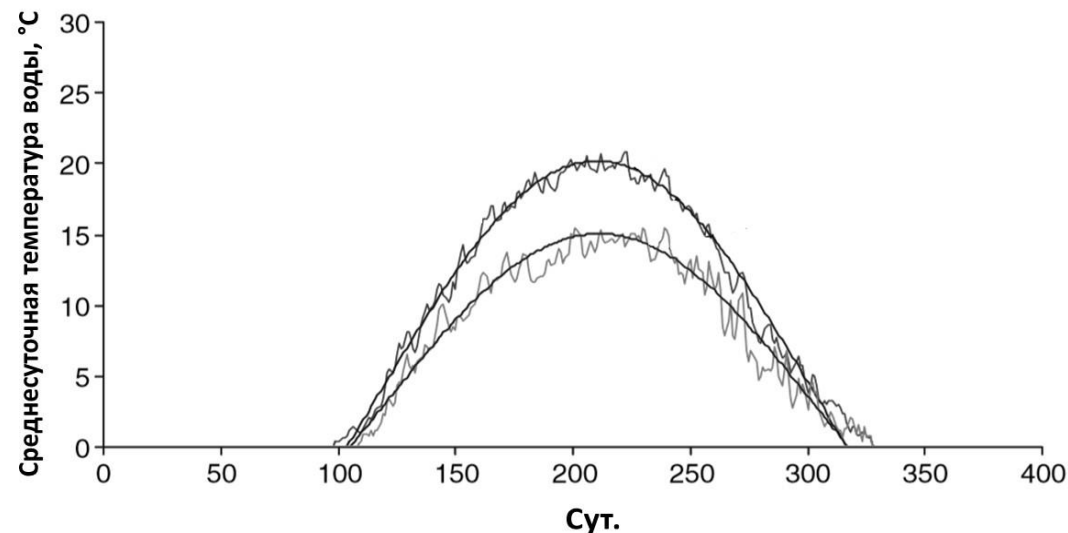
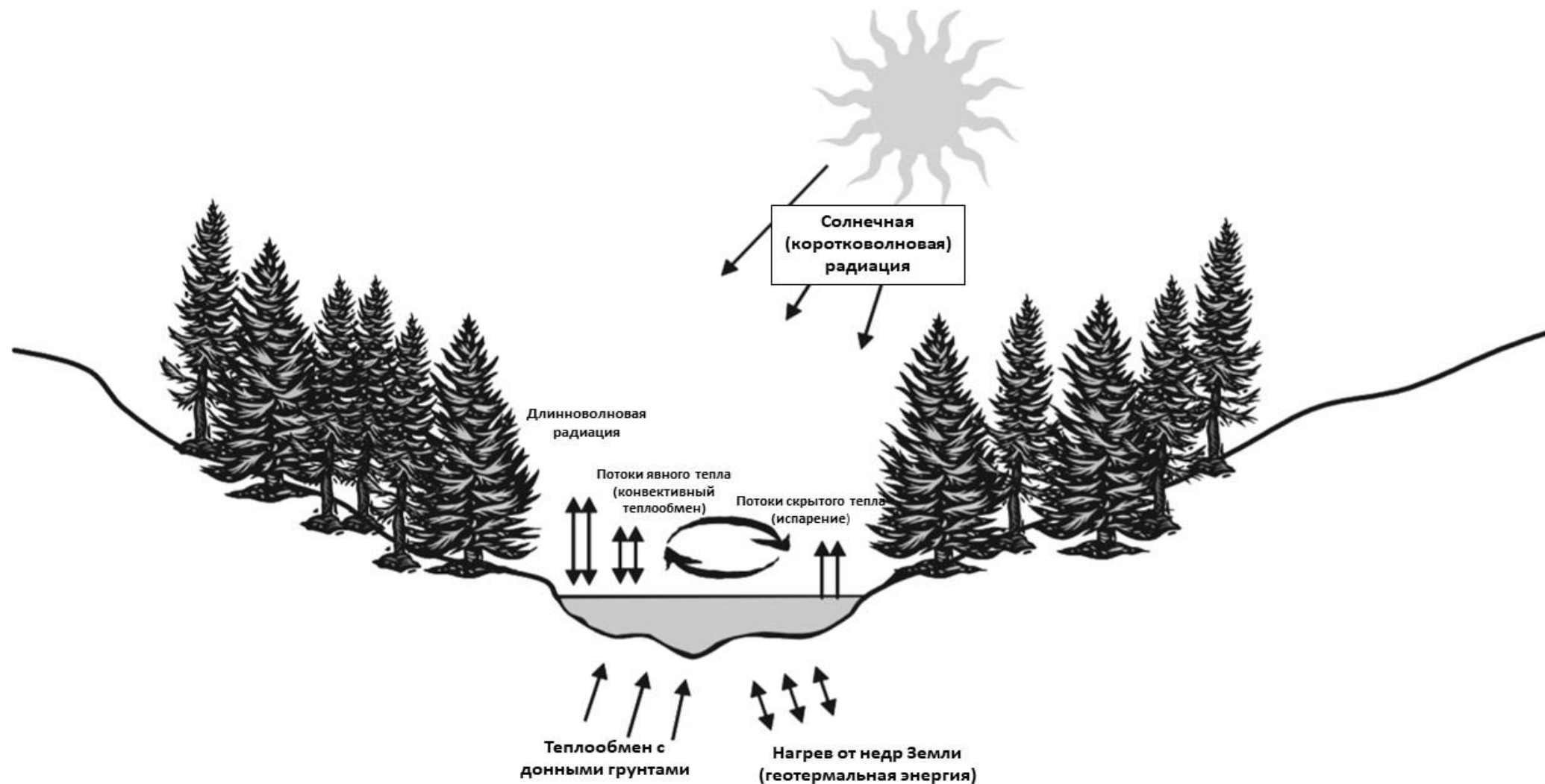


Рис. Годовой ход температуры воды для средних рек юга умеренного пояса (по примеру Канадской реки Miramichi river (1992-1999) [Нью-Брунсвик, Канада]).

Процессы теплообмена

Процессы теплообмена между речным потоком и различными средами (атмосферой и донными грунтами)



Уравнение теплового баланса

Моделирование термического режима рек для климатических моделей производится впервые

Дифференциальное уравнение теплового баланса участка реки:

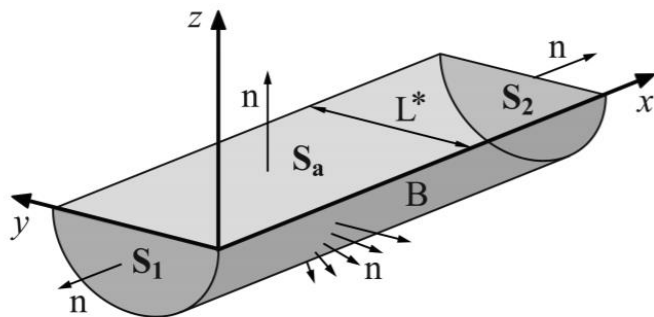


Рис. Параметризация русла
при выводе у-ия теплового баланса

$$C\rho \left[\frac{\partial (\bar{T}S)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{T}\bar{v}S)}{\partial x} \right] = \frac{\partial [(\lambda_x + C\rho\lambda^*) S \frac{\partial T}{\partial x}]}{\partial x} + L(H_a + \bar{Q}_R) + \chi(H_B + \bar{Q}_B)$$

где T — средняя температура воды в реке [$^{\circ}\text{C}$], v — средняя скорость течения [м/с], C — удельная теплоёмкость [$\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$], ρ — плотность воды [кг/м^3], S — площадь поперечного сечения в данном локальном створе [м^2], λ^* — коэффициент турбулентной теплопроводности, L — ширина реки в данном конкретном створе [м], $H_a + \bar{Q}_R$ — слагаемое отвечающее за теплообмен с атмосферой [Вт/м^2], а $H_B + \bar{Q}_B$ — слагаемое отвечающее за теплообмен с донными грунтами [Вт/м^2].

Левая часть (изменение теплосодержания):

$$\boxed{\frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\tau)}{\partial x} = 0} \quad \text{Где } \tau = TS$$

Аппроксимация дифференциальных операторов
на конечно-разностной сетке:

$$\tau_j^{i+1} = \frac{\Delta t}{\Delta x} ((u\tau)_j^i - (u\tau)_{j-1}^i) + \tau_j^i$$

Решение уравнения (аналитическое)

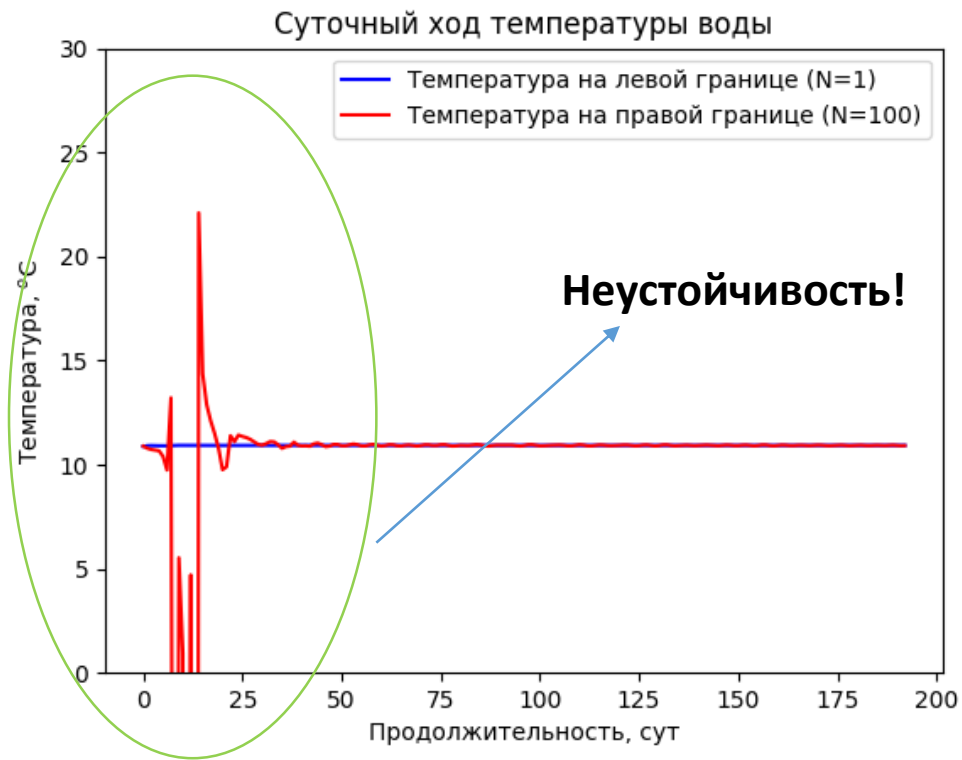
dt = 600 сек. = 10 мин.

T=const Q=const	T=Acos(ωt) Q = const
T = const Q=A cos(ωt))	T = A cos(ωt) Q = A cos(ωt))

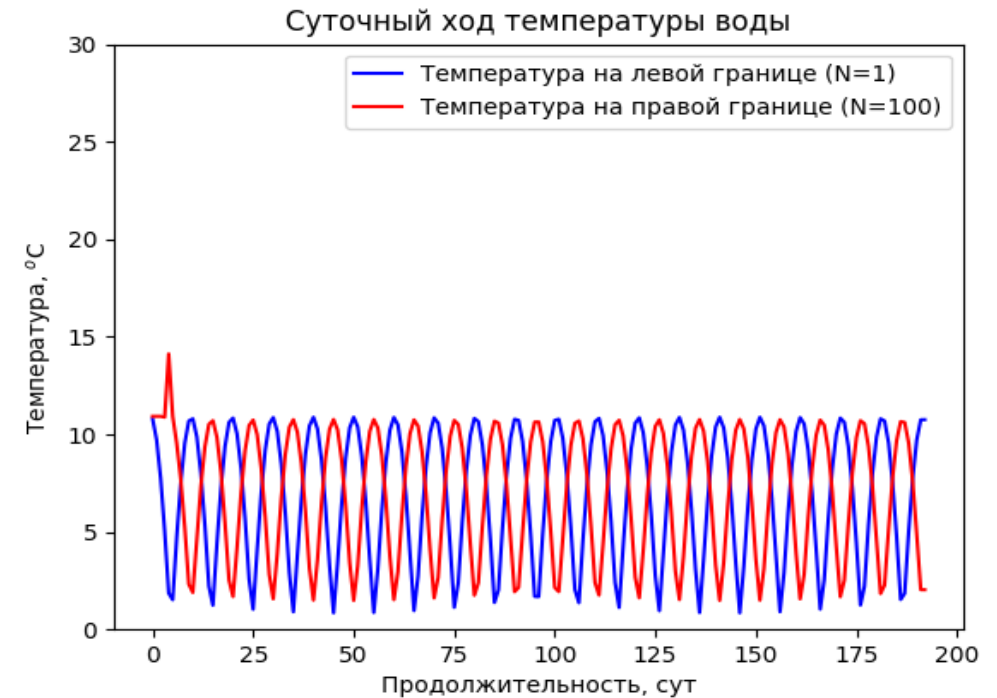
$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\tau)}{\partial x} = 0$$

$$S = \text{const}, T_0 = A \cos(\omega t)$$

$$S = \text{const}, T = \text{const}$$



$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial(T)}{\partial x} = 0 \quad \longrightarrow \quad T_{X=L} = A \cos \left[\omega t - \frac{L\omega}{u} \right]$$



Уравнение теплового баланса

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\tau)}{\partial x} = (H_{si} - H_{sr})(1 - SF) - E - LE - H$$

Изменение
теплосодержания

Коротковолновая
солнечная радиация

Длинноволновая
радиация

Потоки
скрытого тепла

Потоки
явного тепла

The diagram illustrates the heat balance equation with the following components and their physical meanings:

- Left side (red box):** $\frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\tau)}{\partial x}$ represents the change in heat content.
- Right side (blue box):** $(H_{si} - H_{sr})(1 - SF)$ represents shortwave solar radiation.
- Green box:** E represents longwave radiation.
- Blue box:** LE represents latent heat flux (hidden heat flux).
- Blue box:** H represents sensible heat flux (explicit heat flux).

Коротковолновая солнечная радиация

Входные параметры:

- Дата и время
- Альbedo = const
- Солнечная постоянная I_0



Расчёт по формуле: $S(1 - \alpha)(1 - S_f)$

$$S = \frac{I_0 \sin h_0}{1 + \frac{\varepsilon \tau}{\sin h_0}} (1 - C_{sh} n)$$

(формула К. Я. Кондратьева)

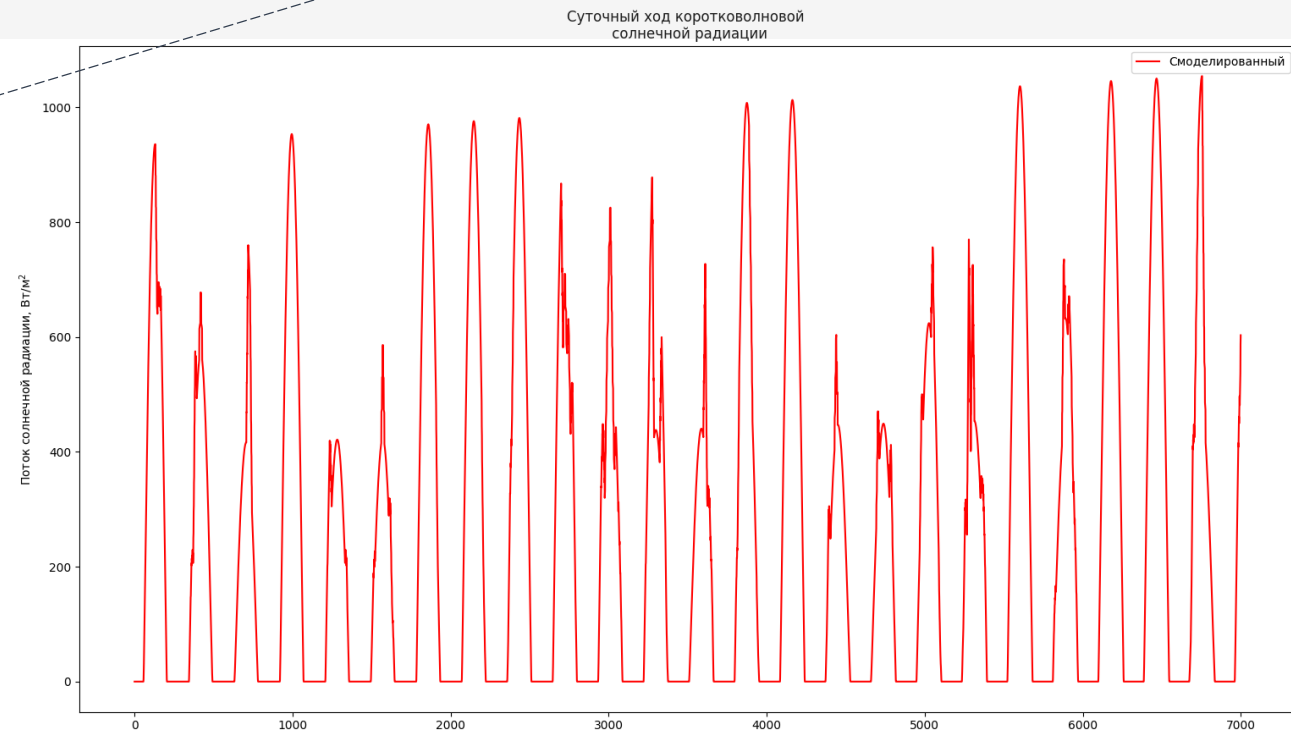
$$\sin h_0 = \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta$$

Склонение Солнца:

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} [d - 81] \right)$$

Часовой угол:

$$\theta = 15(\tau_0 - 12)$$



Результаты, полученные по модели

1

Встречное
излучение
атмосферы

Расчёт по **формуле Брента** (1932):

1. Безоблачное небо

$$E_A = \sigma T_a^4 (a_1 + b_1 \sqrt{e})$$

2. “Закрытое” небо

$$R_{ld} = R_{ldc}(1 - c^{0.671}) + 0.990c^{0.671}\sigma T_a^4$$

equation (21)]
Duarte et al. [2006,
equation (22)]

2

Излучение водной
поверхности

Исходя из закона Стефана-Больцмана:

$$E_S = \sigma \varepsilon T^4$$

Расчёт по аэродинамическим формулам:

1

$$LE = -\rho_a L C_E |V_2| (q_2 - q_s)$$

поток скрытого тепла

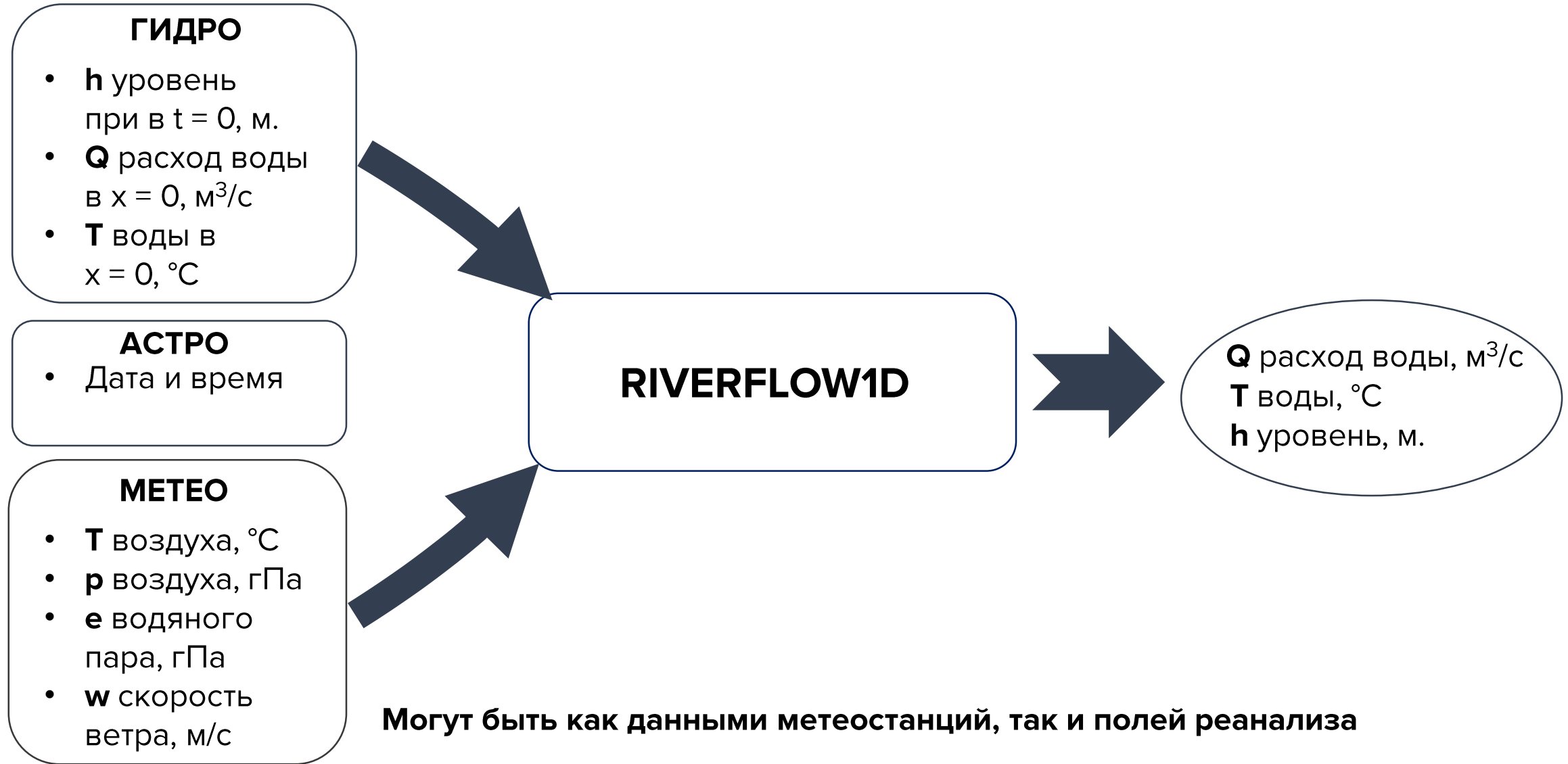
2

$$H = -C_p \rho_a C_H |V_2| (\theta_2 - \theta_s)$$

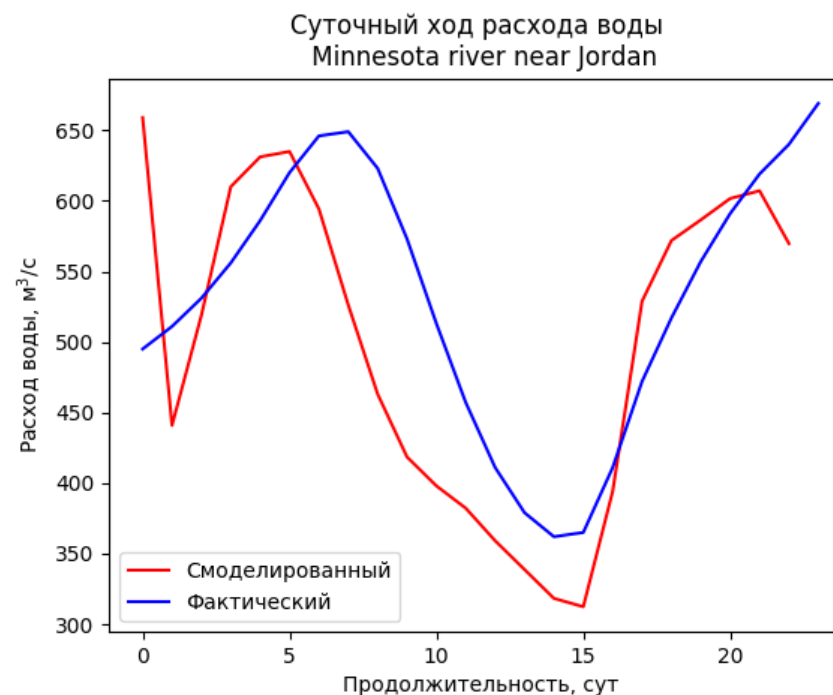
поток явного тепла

- C_E, C_H – коэф. обмена

Модель RIVERFLOW1D + HeatFlux



$$\tau_j^{i+1} = \frac{\Delta t}{\Delta x} ((u\tau)_j^i - (u\tau)_{j-1}^i) + \tau_j^i + S(1 - \alpha)(1 - S_f) \frac{\Delta t}{C_p \rho} - (\sigma T_a^4 (a_1 + b_1 \sqrt{e}) - \epsilon_a \sigma T^4) \frac{\Delta t}{C_p \rho} - \rho_a L C_E |V_2| (q_2 - q_s) - C_p \rho_a C_H |V_2| (\theta_2 - \theta_s)$$



Заключение

1

Автором разработана гидродинамическая модель RIVERFLOW1D на основе уравнений кинематической волны

2

Проведены необходимые модельные расчеты и верификация

3

Модель реализована в блоке деятельного слоя суши климатической модели ИВМ РАН, с аппроксимацией производных по схеме Мак-Кормака, показаны недостатки метода наибольшего градиента

4

Ведется разработка модели термического режима рек в составе гидродинамической модели.
Проведены некоторые численные эксперименты для проверки аналитического решения

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ 17-05-01165

Спасибо за внимание!