

Национальная гидрологическая моделирующая система: разработка и результаты испытаний

Ю.Г. Мотовилов¹, А.Н. Гельфан^{2,1}, О.О. Бородин¹,
А.Н. Бугаец^{1,3,4}, Б.И. Гарцман¹, Л.В. Гончуков^{1,4}, А.С.
Калугин¹, В.М. Морейдо¹, О.В. Соколов^{1,4}

¹Институт водных проблем РАН

²МГУ им. М.В. Ломоносова

³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН

*⁴Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт*

VIII Всероссийский объединенный
метеорологический и гидрологический съезд;
29-31 октября 2024 года, Санкт-Петербург

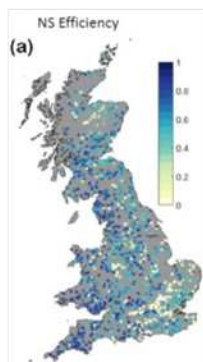
Предварительные сведения

Национальная гидрологическая модель - вычислительная платформа, объединяющая региональную численную модель гидрологических процессов с сервисной информационной средой (базы данных, параметров, ГИС и web-приложения и пр.). НГМ создается как национальный методический и технологический стандарт поддержки принятия решений в области водной безопасности страны и ее регионов с учетом специфики природных условий, национальных систем гидрометеорологического мониторинга и управления водными ресурсами.

USGS National Hydrologic Model (NHM)
(Core Hydrological model – PRMS)



Hydrologic Modelling Framework for Great Britain (HMF-GB)
(Core Hydrological model – CLASSIC)



NOAA National Water Model (NWM)
(Core Hydrological model – WRF-Hydro)



Sweden HYPE-based Model (S-HYPE)
(Core Hydrological model – HYPE)



На протяжении последних 10-15 лет масштабная работа по созданию национальных гидрологических моделей ведется в США (см. обобщение в Tawler et al., 2023), Великобритании (Crooks et al., 2014), ЕС в целом (Donnelly et al., 2016) и отдельных странах Европы (Strömqvist et al., 2012; Bruno et al., 2021), в Китае (Liu et al., 2020), Австралии (Carr et al., 2019).

Предварительные сведения

Разработка отечественной Национальной гидрологической моделирующей системы началась в 2022 год в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ"

Ответственный исполнитель НИР по созданию НГМС – Институт водных проблем РАН – участник Консорциума «Суша: мониторинг и адаптация», который объединяет ГГО им. А.И. Воейкова Росгидромета (руководитель Консорциума), ААНИИ Росгидромета, ГГИ Росгидромета, ИВП РАН, ИПМИ КарНЦ РАН, ФНЦА РАН

Коллектив разработчиков НГМС включает помимо специалистов ИВП РАН специалистов Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, Тихоокеанского института географии ДВО РАН, МГУ им. Ломоносова, при участии Государственного гидрологического института и Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова

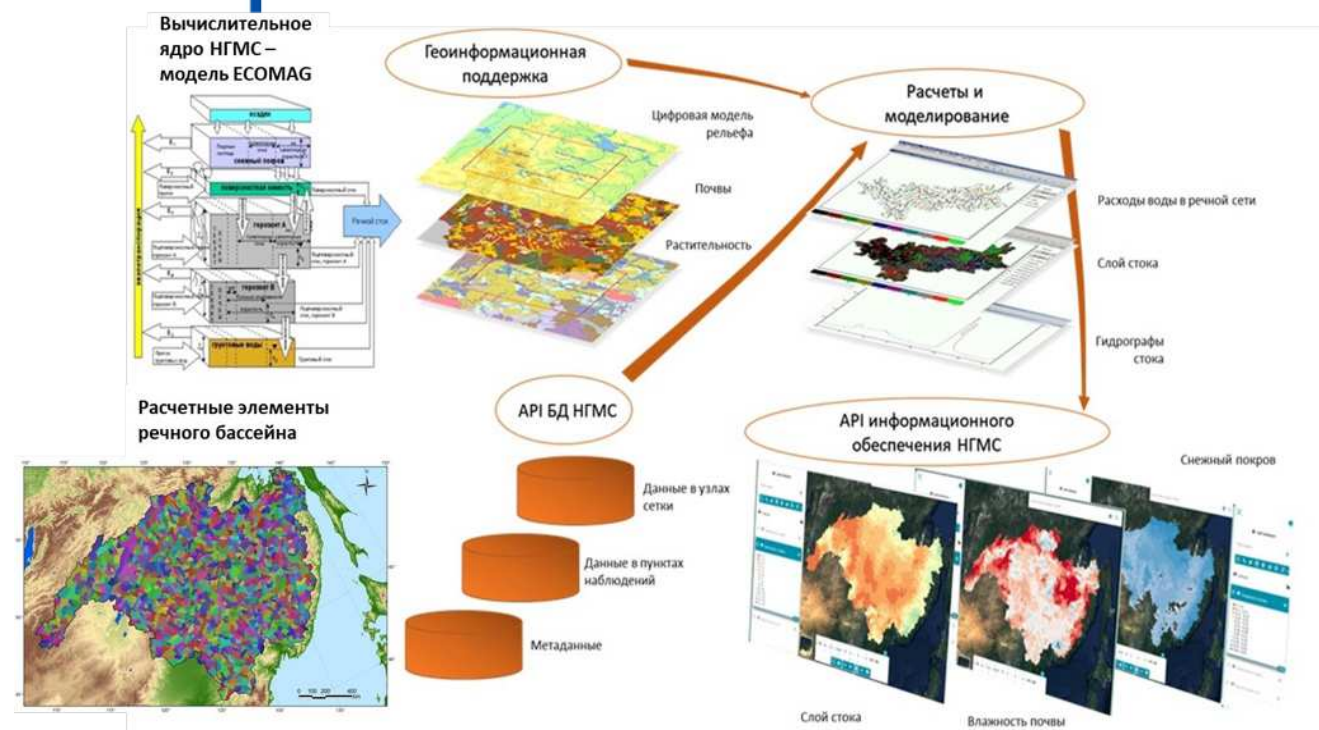
Структура Национальной гидрологической моделирующей системы

НГМС включает 3 подсистемы:

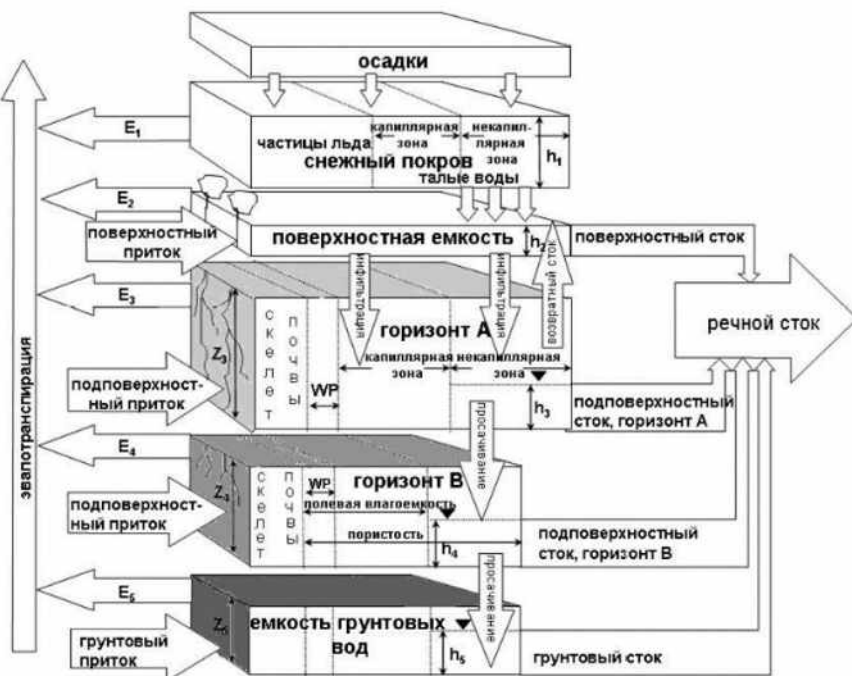
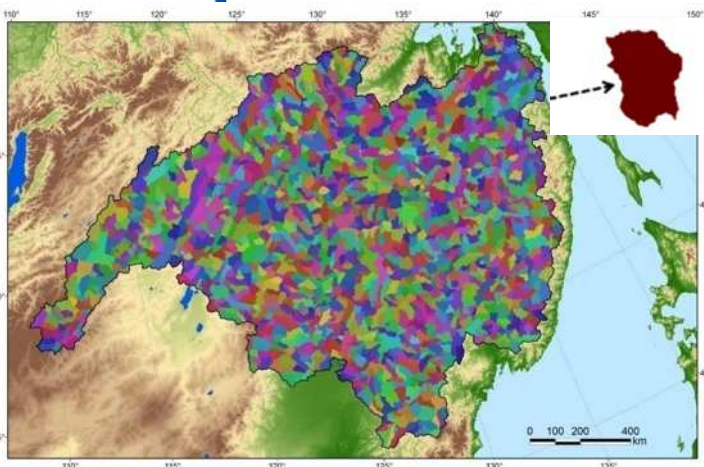
(1) Вычислительное ядро – региональная физико-математическая модель формирования речного стока **ECOMAG** (разработчик Ю.Г. Мотовилов)

(2) Автономная (внутренняя) информационная подсистема, содержащая архивную гидрометеорологическую и водохозяйственную информацию, базы данных о характеристиках подстилающей поверхности, параметрах модели, результатах моделирования, ГИС для обработки и визуализации пространственно-распределенной информации.

(3) Распределенная (внешняя) информационная подсистема баз оперативных данных, веб-сервисов и программных технологий их взаимодействия с ядром НГМС



I. Вычислительное ядро – физико-математическая модель ECOMAG



Поверхностный склоновый сток (индекс 0)

$$\frac{1}{2} \frac{dh_0}{dt} = R - V_0 + V_{f,1} - Q_0 / F, \quad V_0 = K_1 [1 - \exp(-R/K_1)], \quad Q_0 = b r^{1/2} h_0^{5/3} / n.$$

Почвенные горизонты А (i=1) и Б (i=2)

Капиллярная зона (индекс с):

Некапиллярная зона (индекс nc):

$$Z_i \frac{dW_i}{dt} = V_{c,i} - E_i, \quad V_{c,i} = V_{i+1} [1 - (W_i / FCM)^B], \quad \frac{D_i}{2} \frac{dh_i}{dt} = (V_{nc,i} + V_{f,i+1} - V_{f,i} - V_i) - Q_i / F,$$

$$E_i = \begin{cases} k_{s,i} k_e d & \text{for } W_i > W_{e,i}, \\ k_{s,i} k_e d (W_i - W_{e,i}) & \text{for } W_i \leq W_{e,i}, \end{cases} \quad V_{nc,i} = V_{i-1} - V_{c,i}, \quad V_i = \begin{cases} K_{i+1} & \text{for } h_i > 0, \\ 0 & \text{for } h_i = 0, \end{cases}$$

$$Q_i = b K_{x,i} h_i.$$

Зона грунтовых вод (индекс 3)

$$D_3 \frac{dh_3}{dt} = (V_2 - V_g - V_{f,3} - E_3) - Q_3 / F, \quad E_3 = k_{s,3} k_e d, \quad Q_3 = b K_{x,3} h_3.$$

Речной сток (индекс r)

$$\frac{1}{2} \frac{dh_r}{dt} = (Q_{lat} + Q_{r,1} - Q_{r,2}) / F_r, \quad Q_{lat} = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad Q_r = i_r^{1/2} h_r^{5/3} b / n_r.$$

Зимний сезон

Формирование снежного покрова и снеготаяние (индекс 4)

$$\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{d}{dt} (I_4 h_4) = R_s - E_s - S_T + S_f, \quad \frac{dh_4}{dt} = \rho_w \left[\frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I} \right] - v(h_4, I_4, W_4),$$

$$\frac{d}{dt} (W_4 h_4) = R_w + S_T - E_w - V_4 - S_f, \quad V_4 = \begin{cases} (W_4 - WHC) h_4 / \delta t & \text{for } W_4 > WHC, \\ 0 & \text{for } W_4 \leq WHC. \end{cases}$$

Термический режим снега и почвы

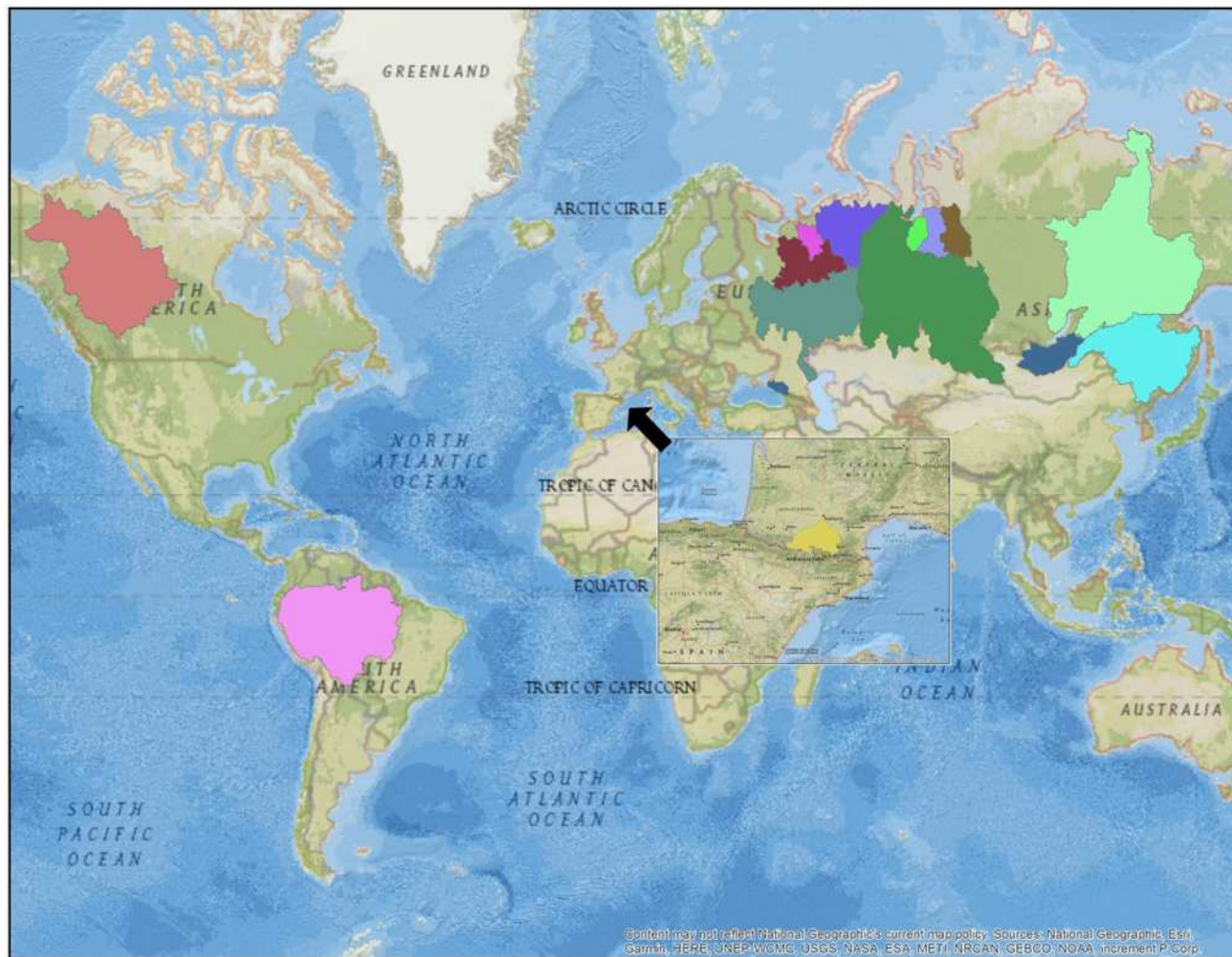
$$Q_f \frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}, \quad H_T = \left(H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f} \delta t \right)^{0.5}, \quad T_0 = \frac{\lambda_S H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h_4}, \quad Q_f = \rho_w L_f (W_1 - W_u).$$

Инфильтрация в мерзлую почву (индекс f)

$$V_f = K_{l,f} \left[1 - \exp \left(V_4 / K_{l,f} \right) \right], \quad K_{l,f} = K_l \left(\frac{P_l - \bar{I} - WP_l}{P_l - WP_l} \right)^4 / (1 + k_i \bar{I})^2, \quad \bar{I} = \frac{\rho_w H_f - H_T}{\rho_i Z_1} (W_1 - W_u).$$

Апробация модели ECOMAG

Результаты апробации по данным наблюдений на многих речных бассейнах, в т.ч. в рамках международных экспериментов, описаны в книге (Мотовилов, Гельфан, 2018) и в многих статьях (за последние 5 лет 12 статей в Q1 WoS).



Апробация модели ECOMAG

Некоторые примеры практических приложений



С 2000-2001 гг. началось поэтапное внедрение ECOMAG в практику подготовки управленческих решений по режимам работы каскадов водохранилищ. Система управления водохранилищами и их каскадами, использующая модель ECOMAG для сезонного прогноза притока воды к водохранилищам, сложилась к 2005 году и функционирует по сегодняшний день.

Схема принятия решений при управлении ВКК

Краткосрочный прогноз притока воды в водохранилища (оперативные испытания в ОАО РусГидро)



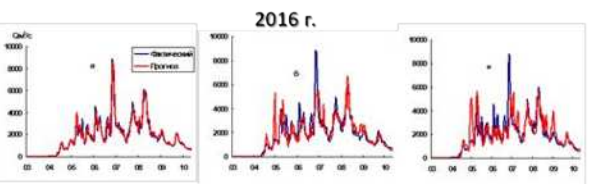
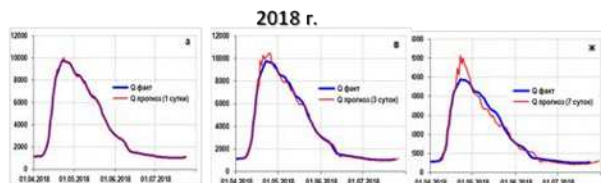
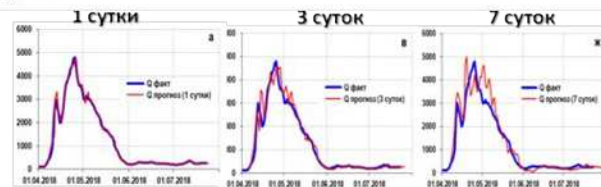
Нижнегородская ГЭС



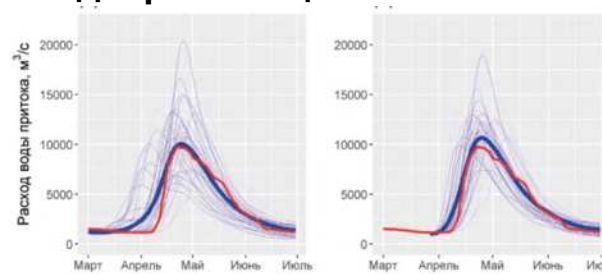
Чебоксарская ГЭС



Бурейская ГЭС



Оперативные испытания в ГМЦ методики ансамблевого сезонного прогноза притока в Чебоксарское водохранилище



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

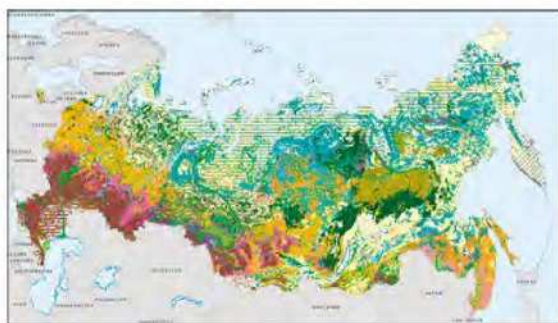
Дата выпуска прогноза	Наибольшее значение фактического притока воды за второй квартал, км³	Фактический приток воды за второй квартал, км³	Абсолютная ошибка прогноза, в км³	Относительная ошибка прогноза, в %
1.03.2018	38,4	36,1	2,2	6 %
15.03.2018	38,7	36,1	2,5	7 %
27.03.2018	38,2	36,1	2,1	5 %
10.04.2018	35,8	36,1	-0,3	-1 %
16.04.2018	34,1	36,1	-2,0	-6 %

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

II. Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

1. Базы данных о характеристиках подстилающей поверхности

1.1 ЦМР, цифровые карты характеристик почв и ландшафтов для территории бывшего СССР



Типы почв



Механический состав почв



Основные типы ландшафтов



Цифровая модель рельефа

Почвенная карта в масштабе 1:2 500 000 разработана коллективом авторов под руководством М. А. Глазовской и представлена в электронном виде Почвенным институтом им. В. В. Докучаева РАН (Почвенная..., 1988).

Ландшафтная карта в масштабе 1:2 500 000 составлена коллективом авторов под руководством В. А. Николаева и представлена в электронном виде Почвенным институтом им. В. В. Докучаева РАН (Ландшафтная..., 1988)

Две ЦМР с разрешением 30x30 секунд (около 1 км) и 3x3 секунды (около 90 м) по данным Global Land Base Elevation (GLOBE)

II. Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

1. Базы данных о характеристиках подстилающей поверхности

1.1 Глобальные базы характеристик почв и землепользования

Harmonized World Soil Database v2.0

<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>

Global Land Cover Characterization (GLCC)

<https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1036354/>

ТИПЫ ПОЧВ		
Albic Luvisols	Eutric Podzoluvisols	Humic Cambisols
Calcaric Arenosols	Eutric Regosols	Lithic Leptosols
Calcaric Cambisols	Ferric Podzols	Luvic Chernozems
Calcaric Fluvisols	Fibric Histosols	Luvic Kastanozems
Calcaric Phaeozems	Gelic Gleysols	Luvic Phaeozems
Calcaric Regosols	Gelic Histosols	Mollic Fluvisols
Calcic Chernozems	Gelic Regosols	Mollic Gleysols
Calcic Gleysols	Gleyic Cambisols	Mollic Planosols
Calcic Kastanozems	Gleyic Chernozems	Mollic Solonchaks
Cambic Arenosols	Gleyic Luvisols	Petric Calcisols
Cambic Podzols	Gleyic Phaeozems	Rendzic Leptosols
CHERNOZEMS	Gleyic Podzols	Rock outcrops
Cumulic Anthrosols	Gleyic Podzoluvisols	Salic Fluvisols
Dunes & shift.sands	Gleyic Solonchaks	Sodic Solonchaks
Dystric Cambisols	Gleyic Solonetz	Stagnic Luvisols
Dystric Fluvisols	Haplic Andosols	Stagnic Phaeozems
Dystric Gleysols	Haplic Arenosols	Terric Histosols
Dystric Leptosols	Haplic Chernozems	Umbric Andosols
Dystric Planosols	Haplic Greyzems	Umbric Gleysols
Dystric Podzoluvisols	Haplic Kastanozems	Umbric Leptosols
Eutric Cambisols	Haplic Luvisols	Urban, mining, etc.
Eutric Fluvisols	Haplic Phaeozems	Water bodies
Eutric Gleysols	Haplic Podzols	
Eutric Leptosols	Haplic Solonchaks	

ТИПЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ
Bare
Bare Rock
Bare Soil / Other Unconsolidated Materials
Broadleaf Deciduous Forest
Broadleaf Evergreen Forest
Cropland
Cropland / Natural Vegetation Mosaic
Herbaceous with sparse Tree / Shrub
Herbaceous, single layer
Lichens / Mosses
Mixed Forest
Needleleaf Deciduous Forest
Needleleaf Evergreen Forest
Open Broadleaf Deciduous Woodland
Rice Paddy
Snow / Ice
Sparse Herbaceous / Shrub
Srubs
Urban
Water
Water (60% - 70%) and many small islands with sand and salt (30% - 40%)
Wetland

II. Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

2. Многолетние данные гидрометеорологического, агрометеорологического и водохозяйственного мониторинга

Данные гидрологического мониторинга



Данные метеорологического мониторинга



Данные агрометеорологического мониторинга



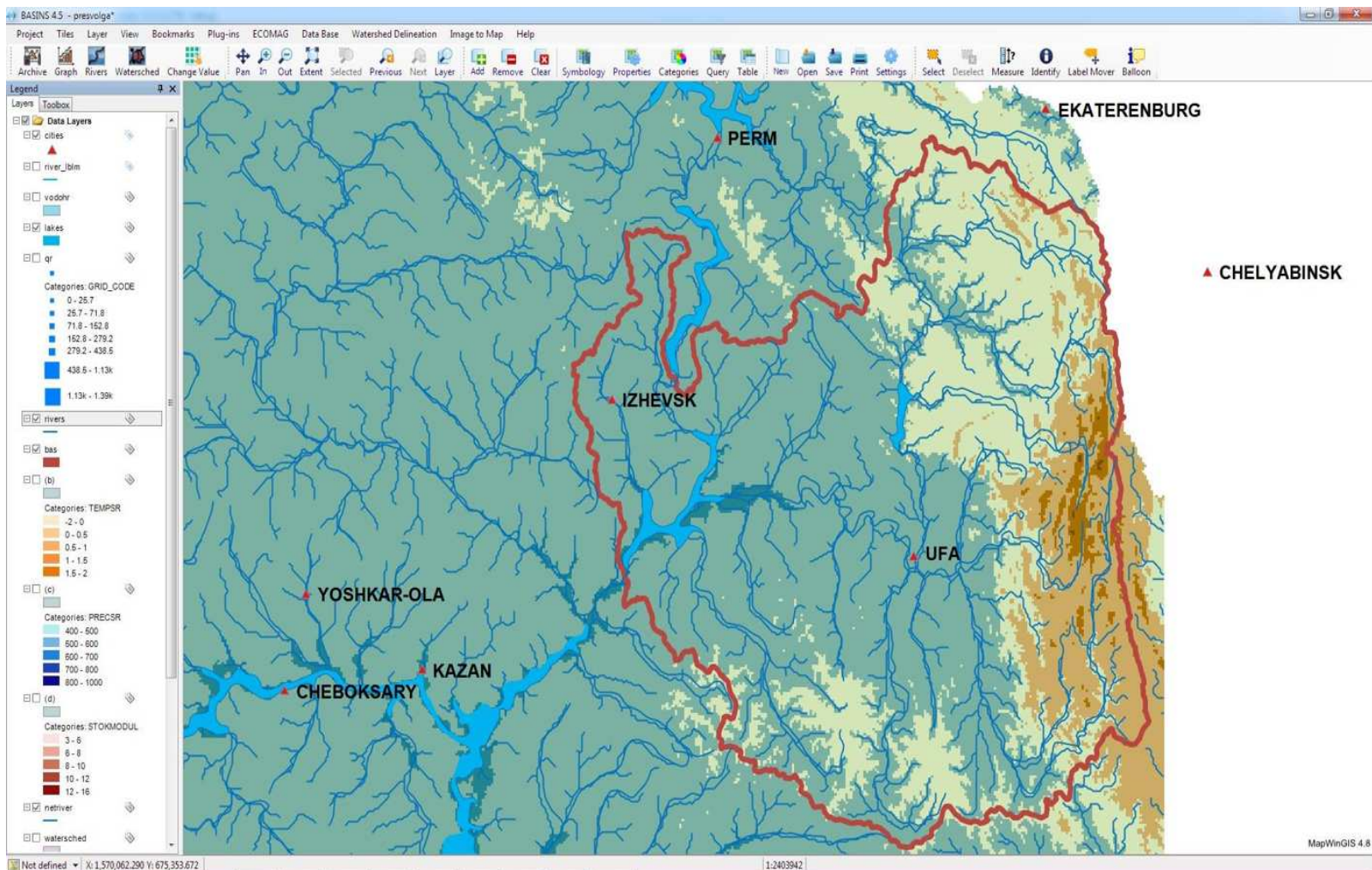
Данные водохозяйственного мониторинга



3. Данные метеорологических реанализов, расчетные данные моделей климата (ISI-MIP)

II. Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

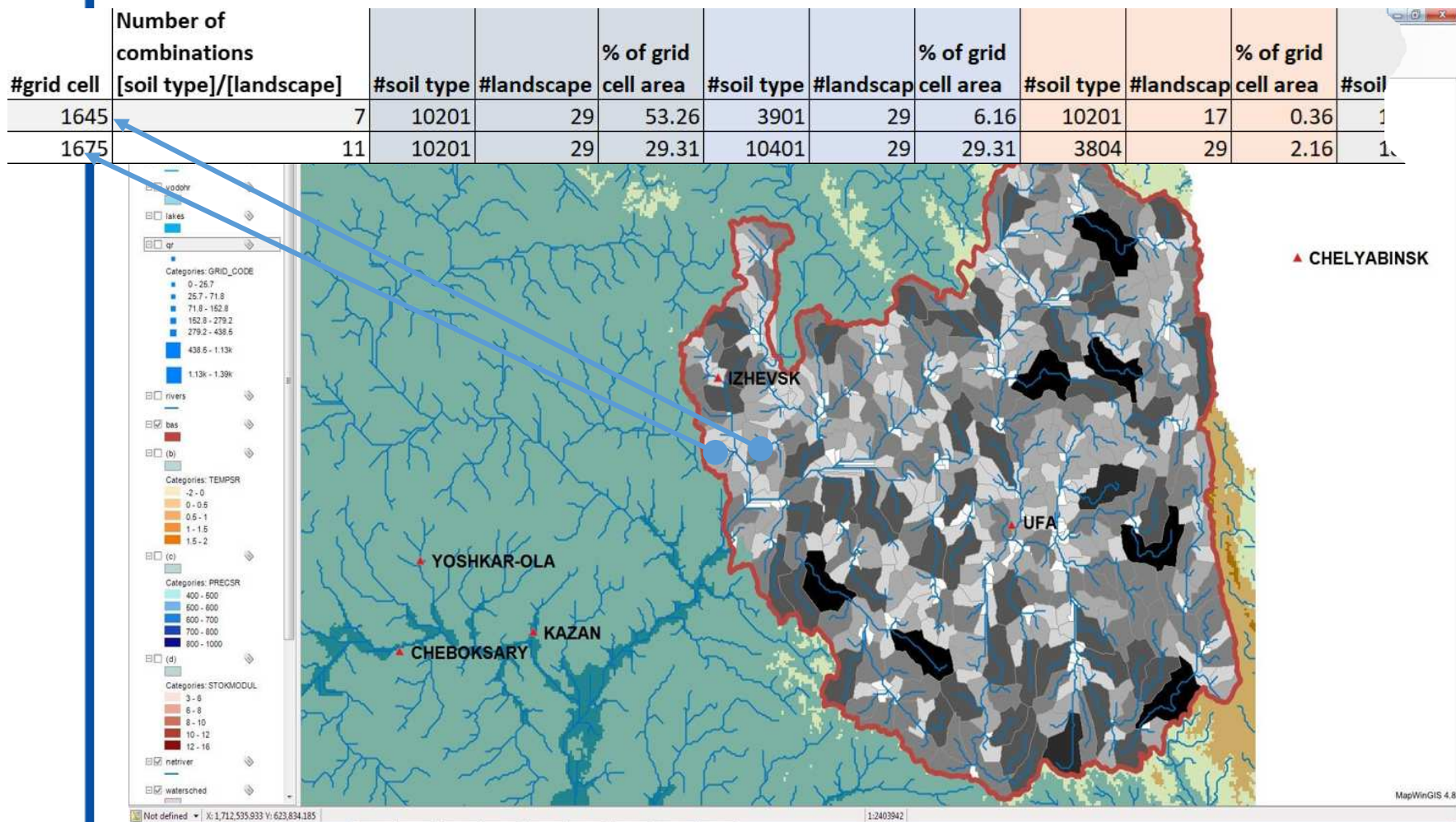
4. Авторские ГИС-приложения (авт. Ю.Г. Мотовилов, О.О. Бородин) для построения речной сети и схематизации водосборной площади по данным ЦМР, разработанная на базе MapWindow



Векторная и смоделированная речная сеть

II. Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

4. ГИС-приложения (авт. Ю.Г. Мотовилов, О.О. Бородин) для построения речной сети и схематизации водосборной площади по данным ЦМР, разработанная на базе MapWindow

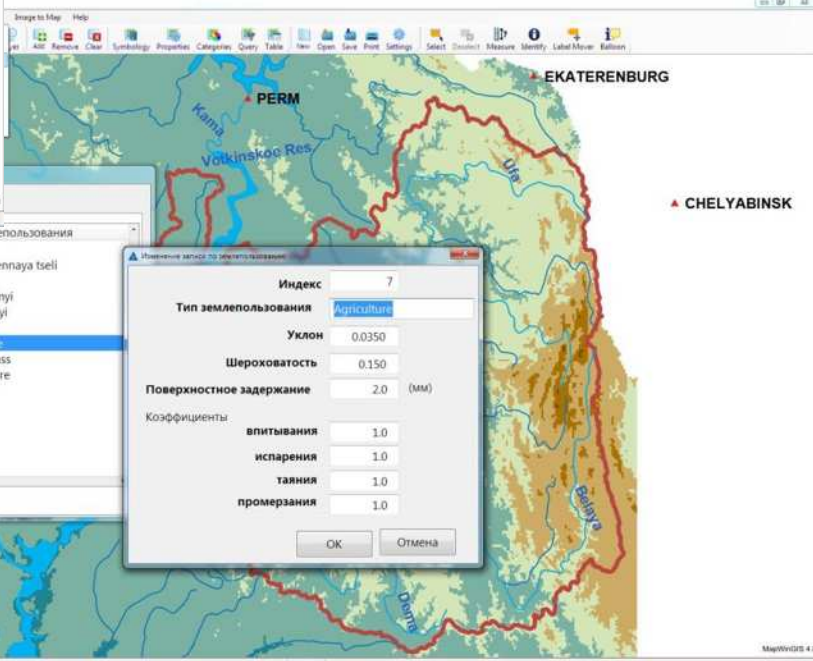
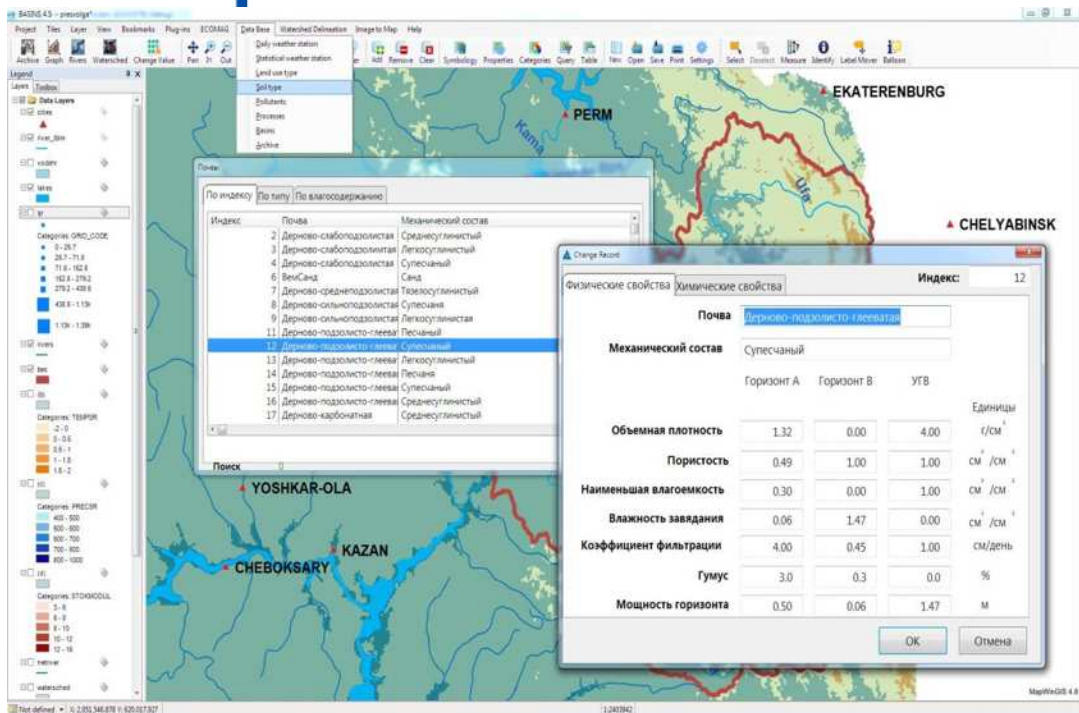


Схематизация речного бассейна (расчетные элементарные водосборы)

Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

4. ГИС-приложения для агрегирования параметров (авт.Ю.Г. Мотовилов, О.О. Бородин) для расчетных элементов; базы

данных параметров модели

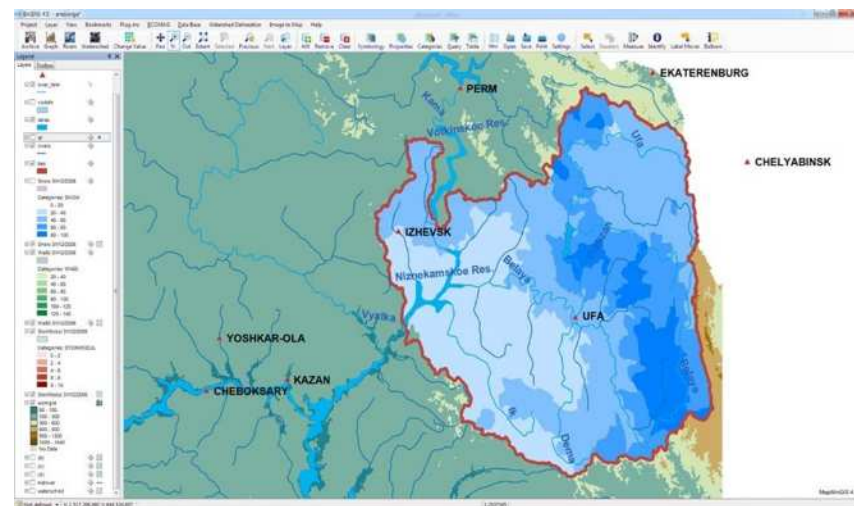
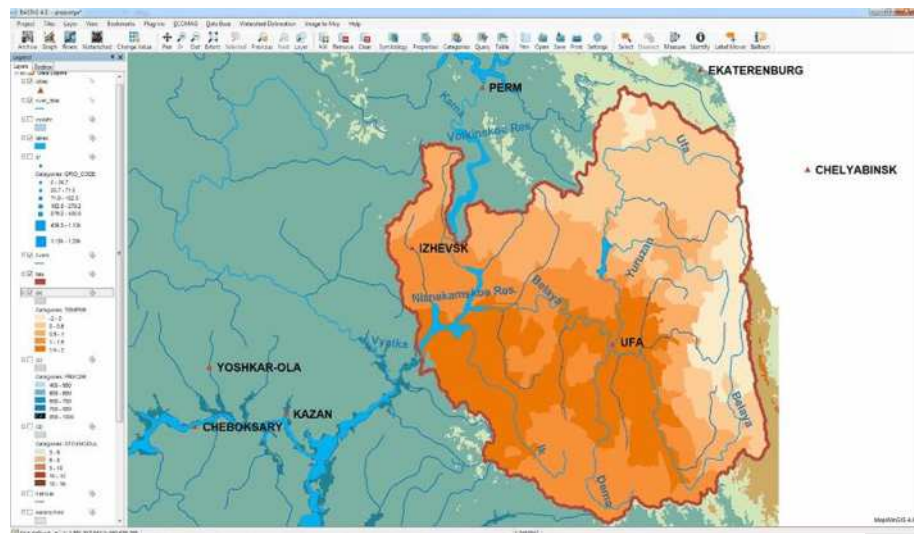


Автономная версия НГМС: ЕСОМАГ+локальная информационная подсистема, включающая:

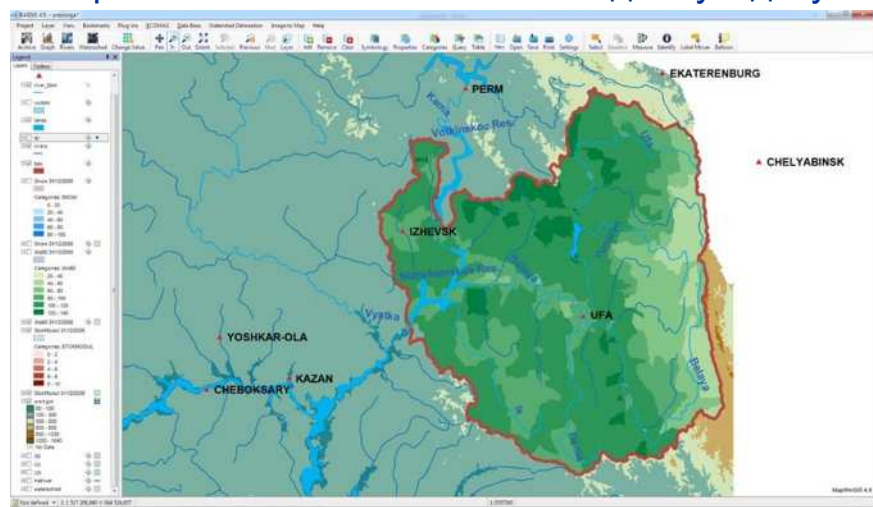
5. Инструменты визуализации полей входных и рассчитанных переменных

Поля температуры воздуха и осадков на заданные даты

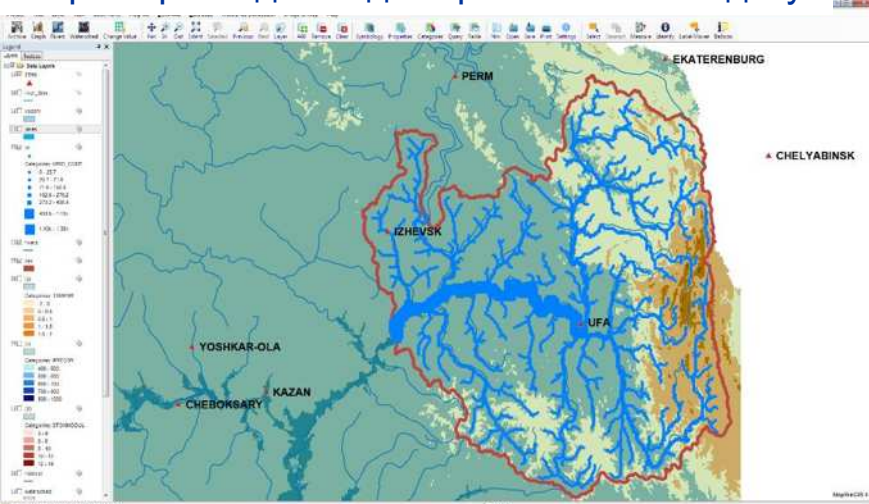
Поле рассчитанных SWEna заданную дату



Поле расч. влагозапаса почвы на заданную дату



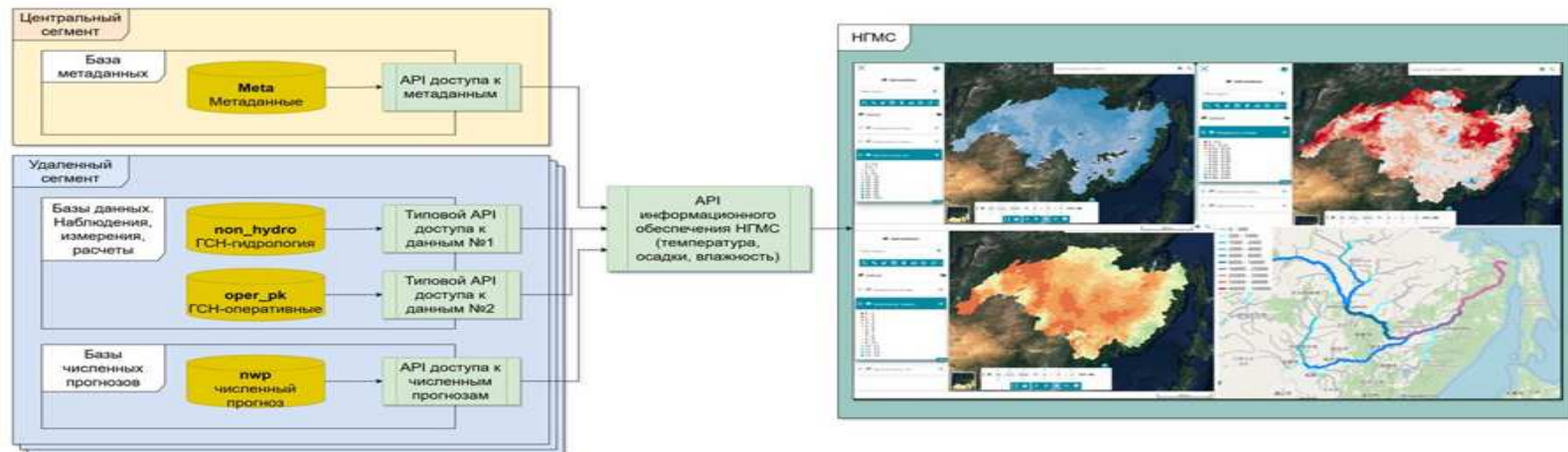
Поля расч.расходов воды в речной сети на дату



III. Распределенная версия НГМС

Взаимодействие вычислительного ядра с программными интерфейсами доступа к данным (разработчики А.Н. Бугаец, Л.В. Гончуков, В.М. Морейдо, О.В. Соколов)

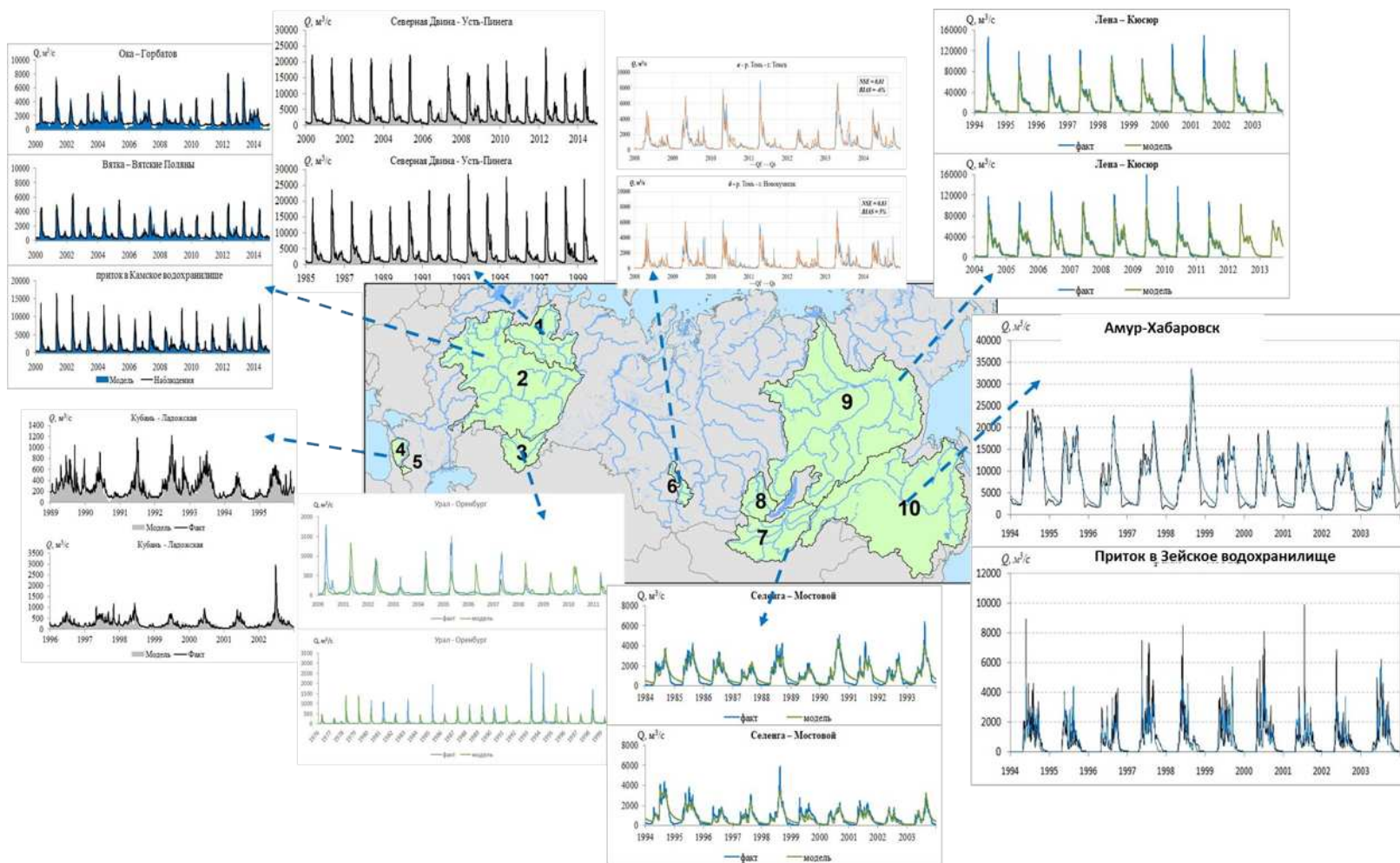
Схема взаимодействия программных интерфейсов доступа к данным



Информационная система поддержки НГМС реализована как сеть распределенных источников гидрометеорологических данных.

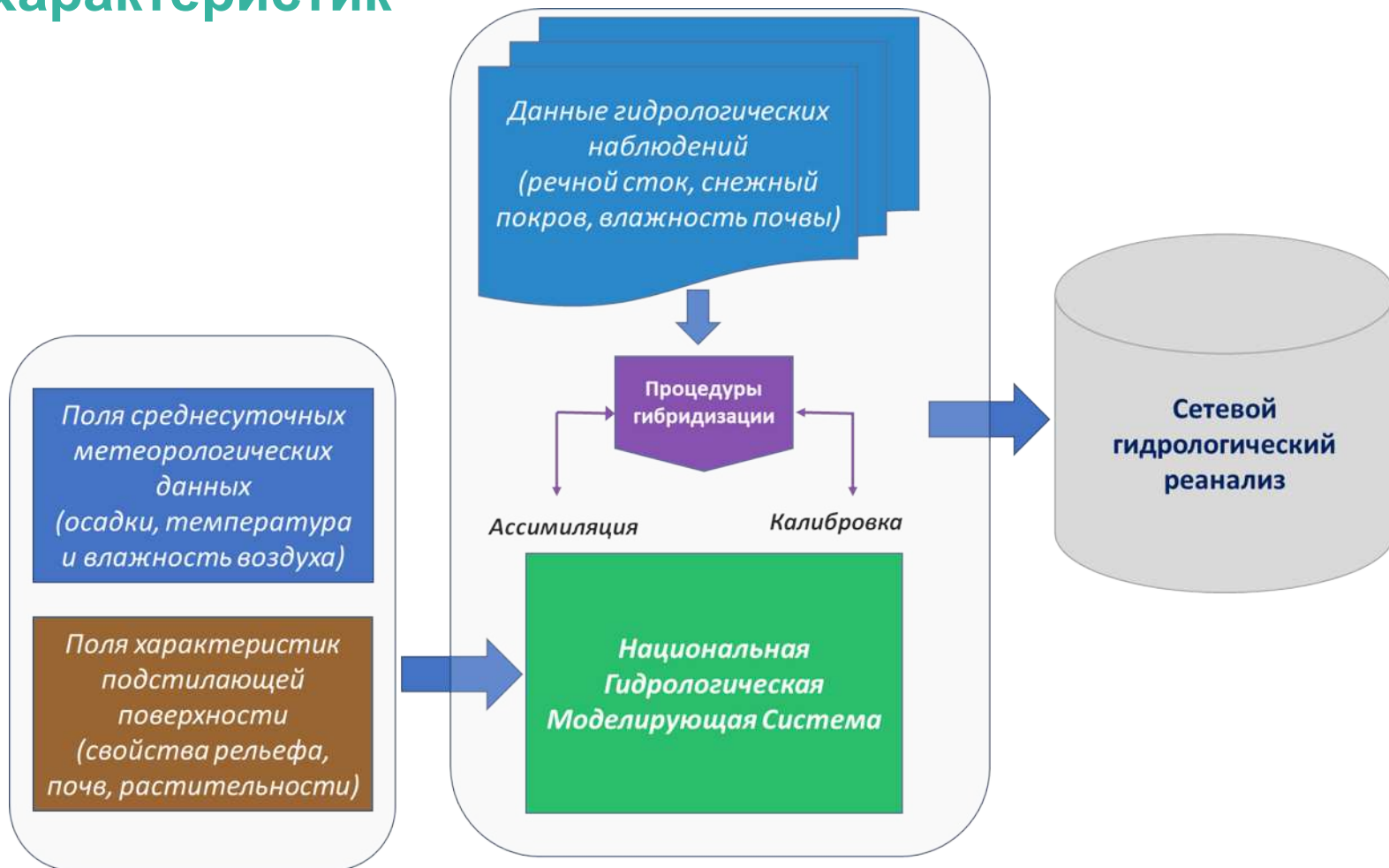
Схемы баз данных, интерфейс прикладного программирования (application programming interface, API) и web-сервисы НГМС обеспечивают высокую эффективность и производительность для хранения и обработки всех видов данных наблюдений, включая данные от автоматических датчиков, а также прогностическую информацию, поступающую из глобальных и региональных систем диагноза и прогноза состояния атмосферы.

Тестирование НГМС на пилотных речных бассейнах



1 – Северная Двина; 2 – бассейны верхней и средней Волги; 3 – Урал; 4 – Кубань; 5 – бассейн Терека (Баксан); 6 – бассейн Оби (Томь); 7 – Селенга; 8 – Ангара; 9 – Лена; 10 – Амур

Создание баз данных реанализа гидрологических характеристик



Процедура формирования данных гидрологического реанализа

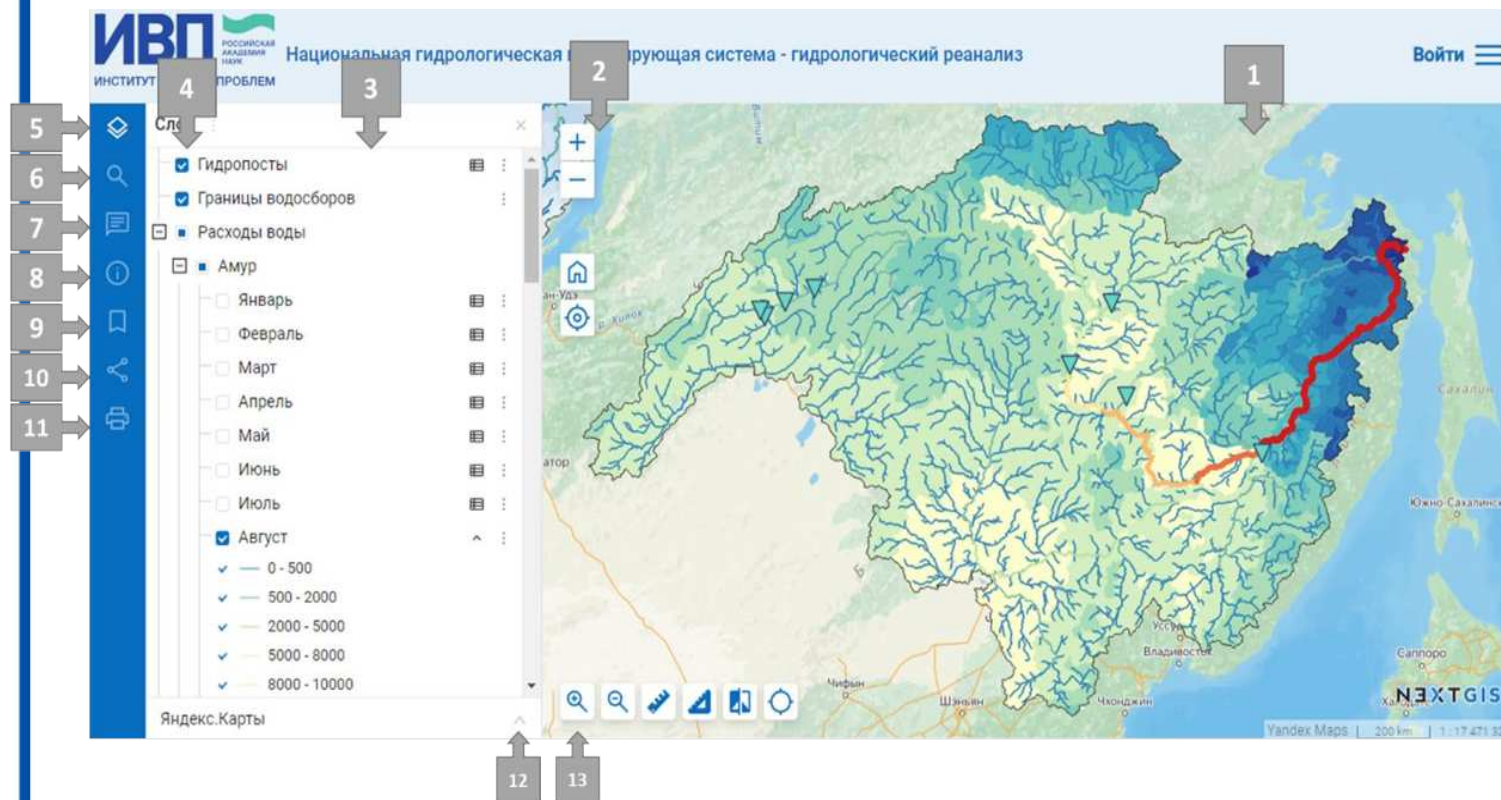
«Гидрологический реанализ – реконструкция для заданной территории распределения гидрологических характеристик за исторический период путем интеграции данных мониторинга и расчетных данных численных гидрологических моделей, обеспечивающей большую точность и полноту результата, чем мониторинг и модели по отдельности».

Создание баз данных реанализа гидрологических характеристик

Созданная с помощью НГМС база данных реанализа включает данные о расходах воды в речной сети, о характеристиках снежного покрова, влажности и глубине промерзания почвы. **Данные покрывают общую площадь 2.2 млн. км² – около 13% территории РФ.** Временное покрытие данных – от 13 до 55 лет. Временное разрешение – 1 сутки. Данные о речном стоке представлены по участкам длиной– 1-1.4 км, данные о других гидрологических переменных – с пространственным разрешением от 950 до 1576 км². Общее количество точек реанализа за весь период – 1.156 млрд.

Бассейн	Площадь, км ²	Расход воды в речной сети, м ³ /с	Запас воды в снежном покрове, мм	Высота снежного покрова, см	Влагозапас 50-см верхнего слоя почвы, мм	Глубина промерзания почвы, см	Период
Количество точек реанализа за период							
Амур	1 875 300	1 103 040 950	39 086 025	39 086 025	39 086 025	39 086 025	1966-2020
Лена	131 542	25 781 045	422 305	422 305	0	0	2008-2020
Вятка	123 240	17 863 100	576 700	576 700	576 700	576 700	2001-2020
Ока	67 768	9 292 900	313 900	313 900	0	313 900	2001-2020
Сумма	2 197 850	1 155 977 995	40 398 930	40 398 930	39 662 725	39 976 625	
Пространственное разрешение							
Амур	1 875 300	1.19 км	950 км ²	950 км ²	950 км ²	950 км ²	1966-2020
Лена	131 542	1.18 км	1478 км ²	1478 км ²			2008-2020
Вятка	123 240	1.19 км	1560 км ²	1560 км ²	1560 км ²	1560 км ²	2001-2020
Ока	67 768	1.04 км	1576 км ²	1576 км ²		1576 км ²	2001-2020
Временное разрешение							
Амур	1 875 300	Сут.	Сут.	Сут.	Сут.	Сут.	1966-2020
Лена	131 542	Сут.	Сут.	Сут.			2008-2020
Вятка	123 240	Сут.	Сут.	Сут.	Сут.	Сут.	2001-2020
Ока	67 768	Сут.	Сут.	Сут.		Сут.	2001-2020

Веб-ГИС приложение для отображения данных реанализа гидрологических характеристик



Общий вид рабочего окна веб-ГИС «Национальная гидрологическая моделирующая система - гидрологический реанализ».

Инструменты онлайн-карты: 1 – карта; 2 – кнопки управления масштабом карты; 3 – дерево слоев; 4 – выпадающее меню выделенного слоя; 5 – список слоев; 6 – строка поиска; 7 – панель аннотаций; 8 – панель описания; 9 – панель закладок; 10 – ссылка на карту; 11 – печать; 12 – выбор подложки; 13 – инструменты карты

Заключение

1. В рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения **разработана Национальная гидрологическая моделирующая система** – информационный продукт, объединяющий отечественную вычислительную платформу – физико-математическую модель ECOMAG, созданную в ИВП РАН, с базами данных для задания краевых условий и параметров моделей, а также с геоинформационными и веб-технологиями, обеспечивающими взаимодействие вычислительной платформы с автономными и внешними базами данных.
2. **Впервые для речных водосборов РФ** на основе отечественного программного обеспечения – Национальной гидрологической моделирующей системы, **создана база данных гидрологического реанализа за многолетний период**, интегрирующая данные гидрологического моделирования и данные гидрологического мониторинга Росгидромета.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ