

# Национальная гидрологическая моделирующая система как элемент развития сети климатического и экологического мониторинга для поддержки адаптационных решений

А.Н. Гельфан<sup>1,2</sup>, Ю.Г. Мотовилов<sup>1</sup>, О.О. Бородин<sup>1</sup>,  
А.Н. Бугаец<sup>1,3</sup>, Б.И. Гарцман<sup>1</sup>, Л.В. Гончуков<sup>1,3</sup>, А.С. Калугин<sup>1</sup>,  
В.М. Морейдо<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН*

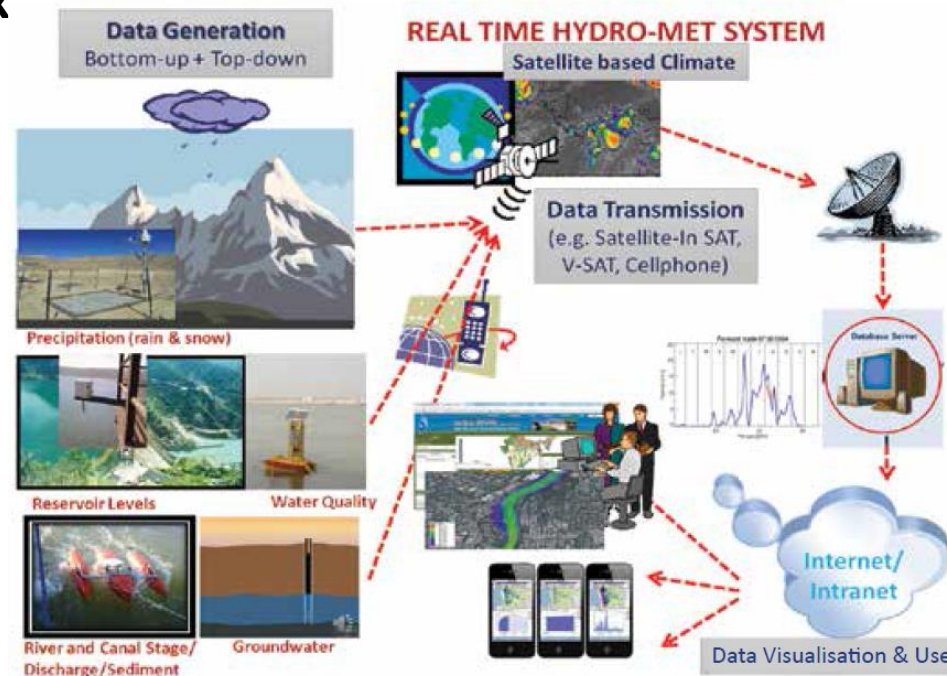
*<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова*

*<sup>3</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН*

**«НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА  
КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ: ПРОБЛЕМЫ И  
РЕШЕНИЯ» ИНИОН РАН, Москва, 02 ноября 2023 года**

# Постановка проблемы

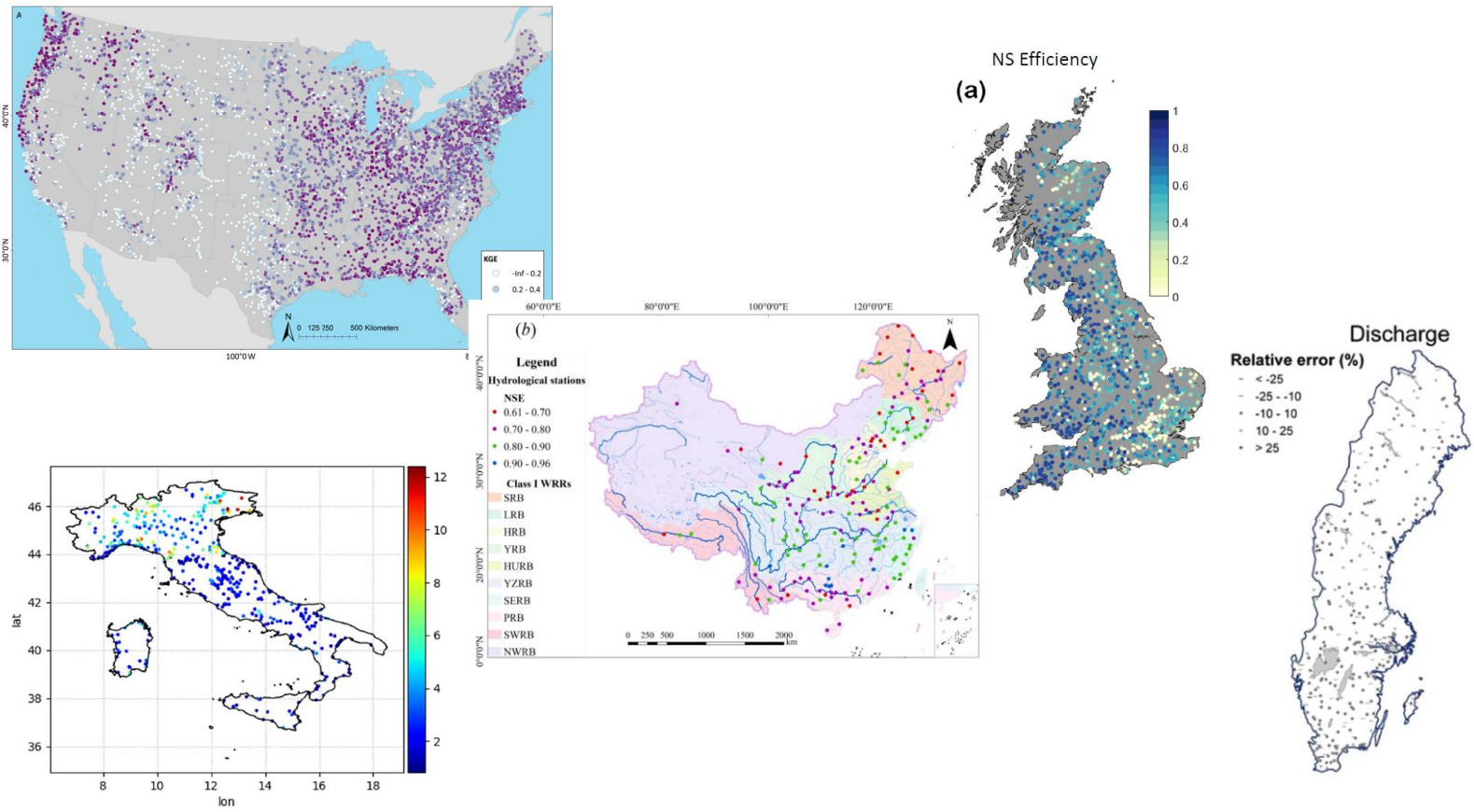
Современные системы климатического, гидрометеорологического и экологического мониторинга, используют, **наряду с прямыми наблюдениями, высокотехнологичные компоненты физико-математического моделирования**, позволяющие оценивать и прогнозировать трансформацию природных систем в результате изменения климата, потоки климатически активных веществ, их запасы в различных экосистемах, проводить ретроспективные анализы компонент климатической системы, включая природные системы суши. Такие инструменты моделирования позволяют **восполнять недостающие данные наблюдений, в т.ч. для территорий, не охваченных сетью мониторинга**, и стать важной составляющей информационной поддержки принятия решений в области экологической (низкоуглеродной) трансформации отраслей экономики, адаптации экономики и населения к изменению климата.



# Постановка проблемы

Национальные гидрологические моделирующие системы (НГМС) становятся необходимым компонентом государственных систем мониторинга в экономически развитых странах мира. **Задача разработки отечественной НГМС становится в условиях современных вызовов особенно актуальной.**

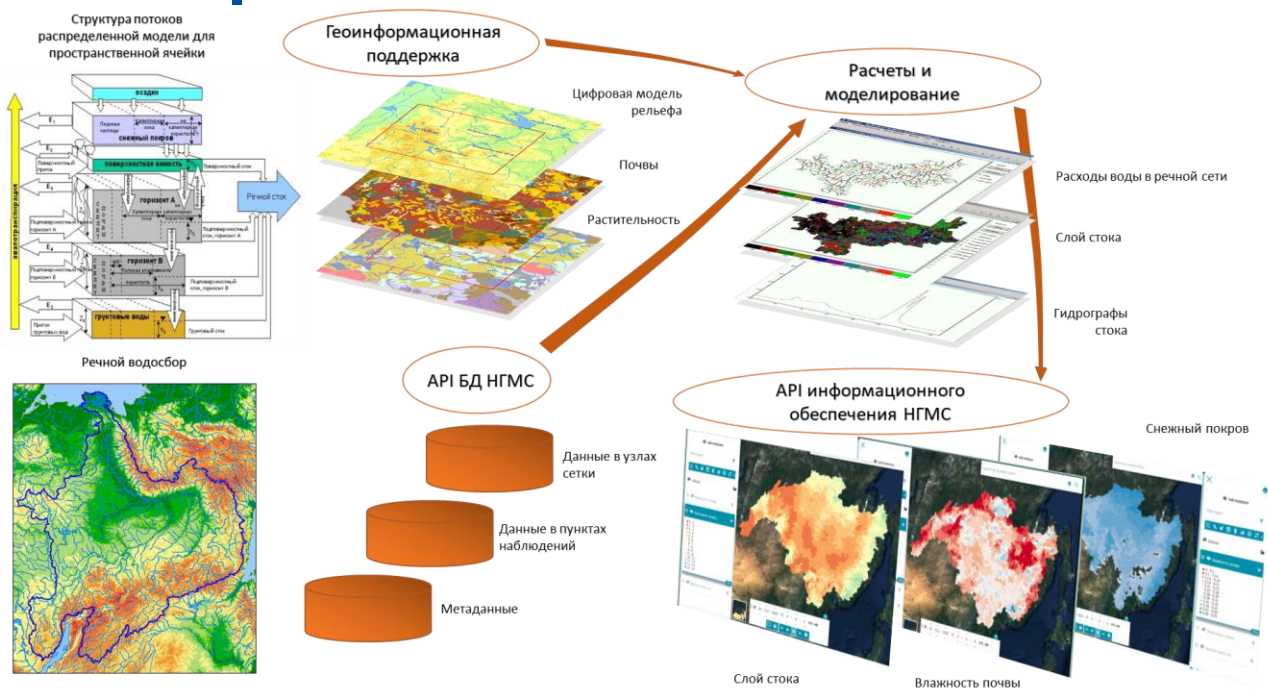
*Примеры результатов тестирования современных национальных гидрологических систем, разрабатываемых с начала 2010-х годов в экономически развитых странах мира*



## Основания работ по созданию НГМС в 2023-24 гг.

Решение Совета Федеральной научно-технической программы (ФНТП) в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021-2030 годы от 21.09.2022 №4 о создании 6-ти научно-образовательных центров (консорциумов) для реализации ФНТП и важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ", включая Консорциум «Суша: мониторинг и адаптация» в составе ГГО им. А.И. Воейкова Росгидромета (руководитель Консорциума), ААНИИ Росгидромета, ГГИ Росгидромета, **ИВП РАН**, ИПМИ КарНЦ РАН, ФНЦА РАН

# Структура Национальной гидрологической моделирующей системы



Структура НГМС включает 3 подсистемы:  
**(1) Вычислительное ядро** – физико-математические гидрологические модели и их программное обеспечение, созданные на базе отечественной гидрологической моделирующей платформы **ЕСОМАГ**,

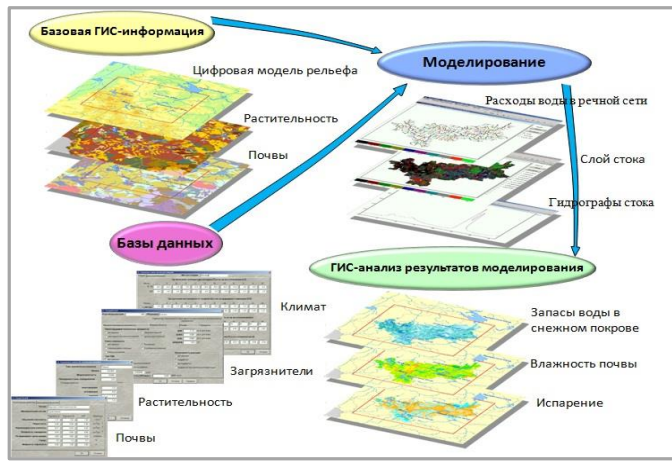
**(2) Геоинформационная подсистема**, содержащая архивную гидрометеорологическую и водохозяйственную информацию, базы данных о характеристиках подстилающей поверхности, параметрах модели, результатах моделирования, ГИС для обработки и визуализации пространственно-распределенной информации.;

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

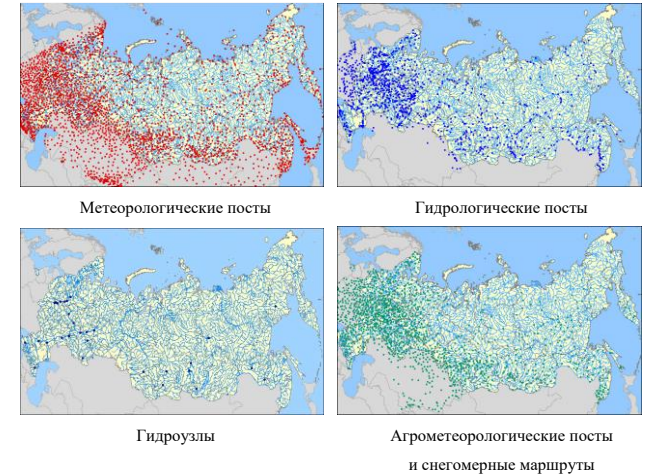


# Вычислительное ядро и геоинформационная подсистема НГМС на базе гидрологической моделирующей платформы ECOMAG\*

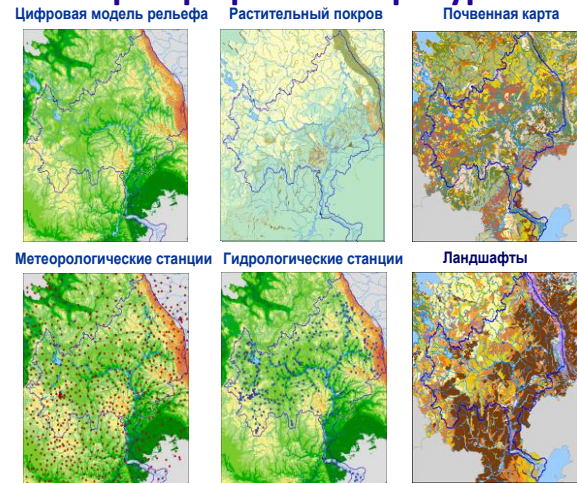
## Структура ГИМК ECOMAG



## Информационные ресурсы



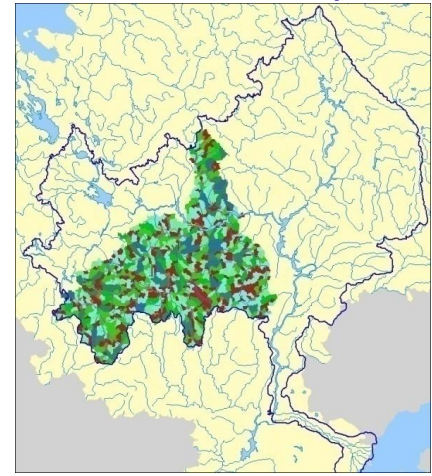
## Картографические ресурсы



## Базы данных

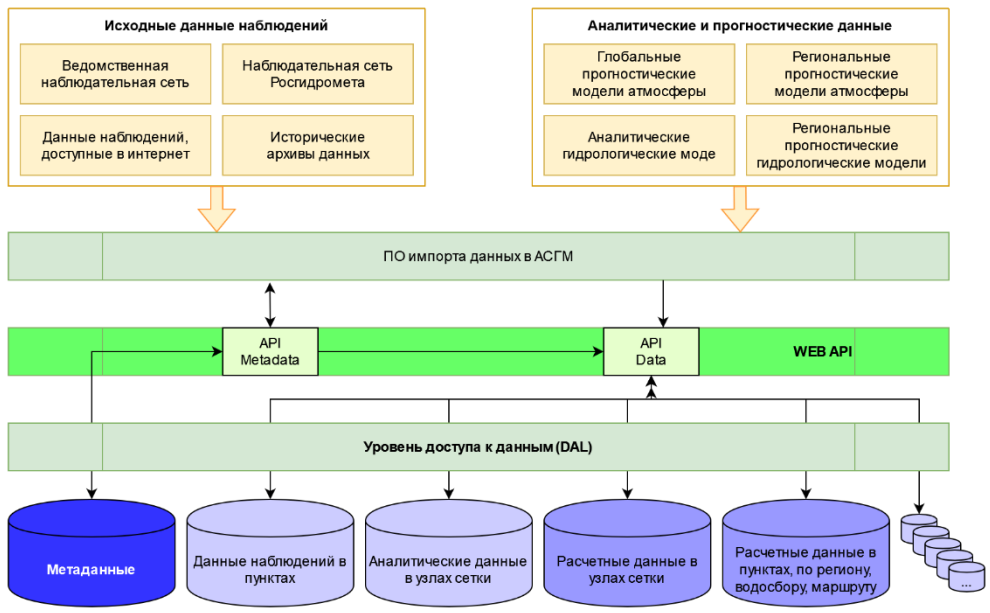
| Change Record                         |            |            |      |                                  |
|---------------------------------------|------------|------------|------|----------------------------------|
| Физические свойства                   |            |            |      |      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

## Схематизация по ЦМР



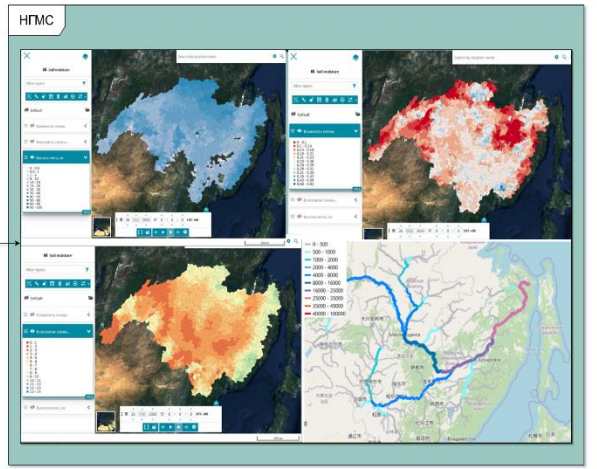
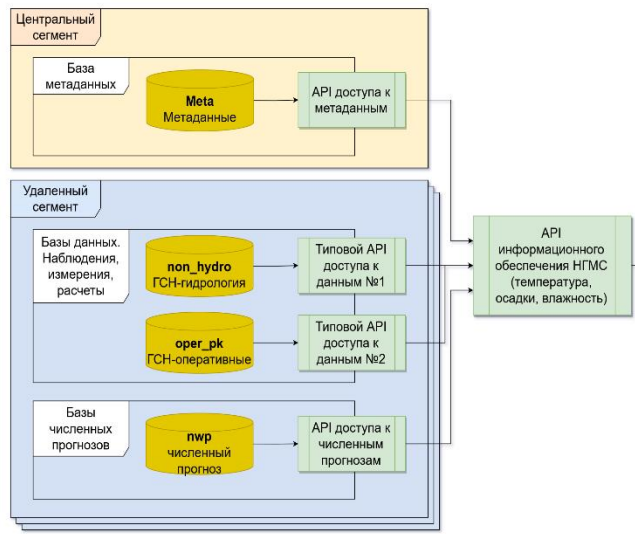
Motovilov Y. et al. (1999) ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Dep. Geoph. Univ. Oslo, Institute Report Series no.105, 88 p.  
 Motovilov Yu. et al. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation, Agric. Forest Meteor., 1999, vol. 98–99, pp. 257–277

# Структура распределенной информационной подсистемы и ее взаимодействие с ядром НГМС



Информационное обеспечение НГМС осуществляется распределенной в пространстве информационной структурой сервисов, источников, потоков и баз данных, обеспечивающей различные режимы работы НГМС. В качестве источников данных используются данные сети общегосударственной сети наблюдений (ОГСН) Росгидромета (приоритетный), исторические архивы, данные метеорологического реанализа и расчетные данные климатических моделей. Импорт данных в НГМС осуществляется через уровень программных интерфейсов приложений (API) на основе интернет доступа (WEB API).

Встраивание ядра НГМС (гидрологической моделирующей платформы ECOMAG) осуществляется с помощью web-сервисной технологии и стандарта OpenMI 2.0, что позволяет использовать расчетные модули ECOMAG в качестве удаленных моделирующих блоков и источников данных при построении распределенной вычислительно-информационной системы.

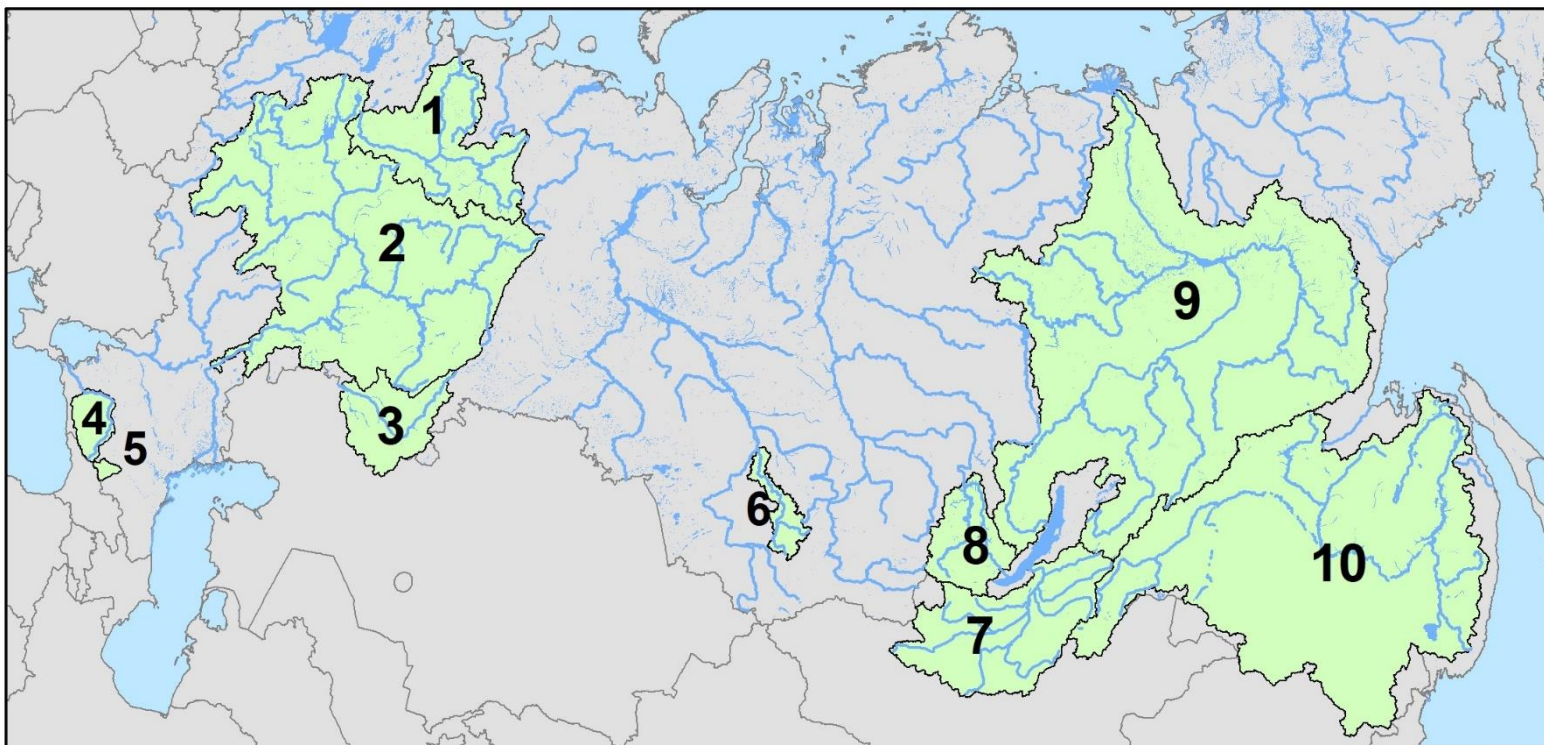




# Тестирование вычислительного ядра НГМС на пилотных речных бассейнах

## Критерии выбора пилотных объектов

1. Пилотные речные бассейны подвержены значимым климатическим рискам
2. Результаты, полученные по пилотным речным бассейнам, могут быть распространены на другие водные объекты территории страны.
3. Наличие трансграничных речных бассейнов, требующих специфических подходов к разработке мероприятий по адаптации к изменению климата.

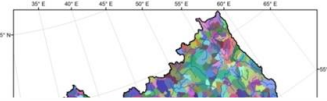


- 1 – Северная Двина; 2 – бассейны верхней и средней Волги; 3 – Урал; 4 – Кубань; 5 – бассейн Терека (Баксан); 6 – бассейн Оби (Томь); 7 – Селенга; 8 – Ангара; 9 – Лена; 10 – Амур



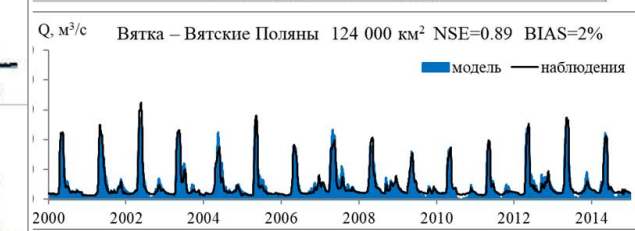
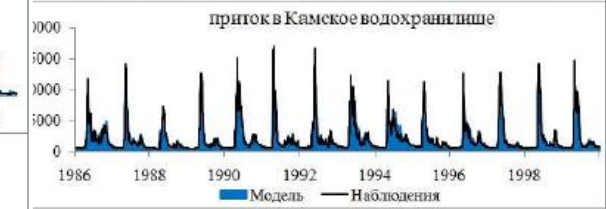
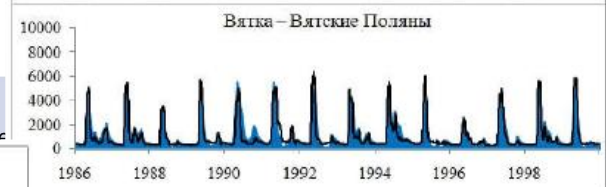
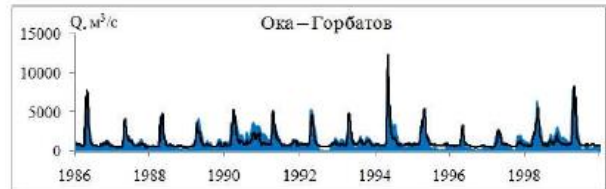
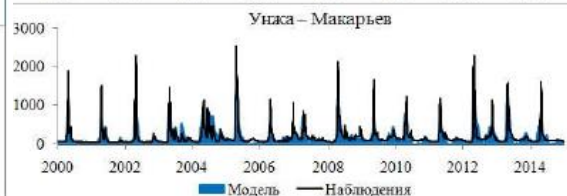
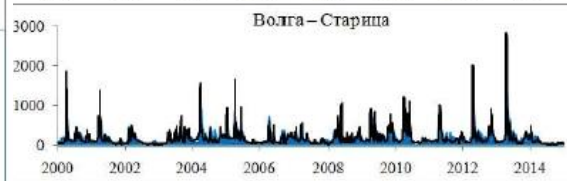
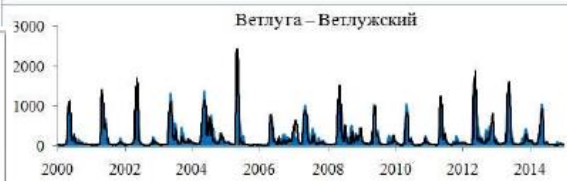
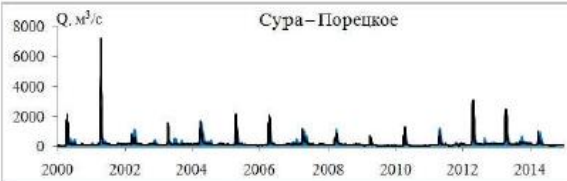
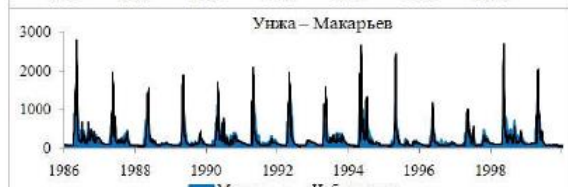
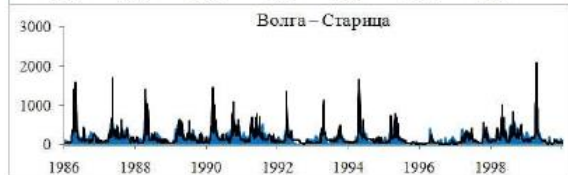
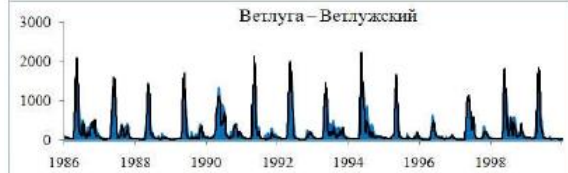
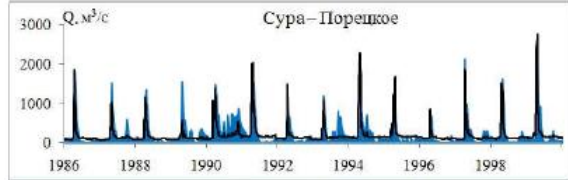
# Результаты тестирования вычислительного ядра НГМС на пилотных речных бассейнах (р. Волга)

Схематизация речного бассейна



Параметры

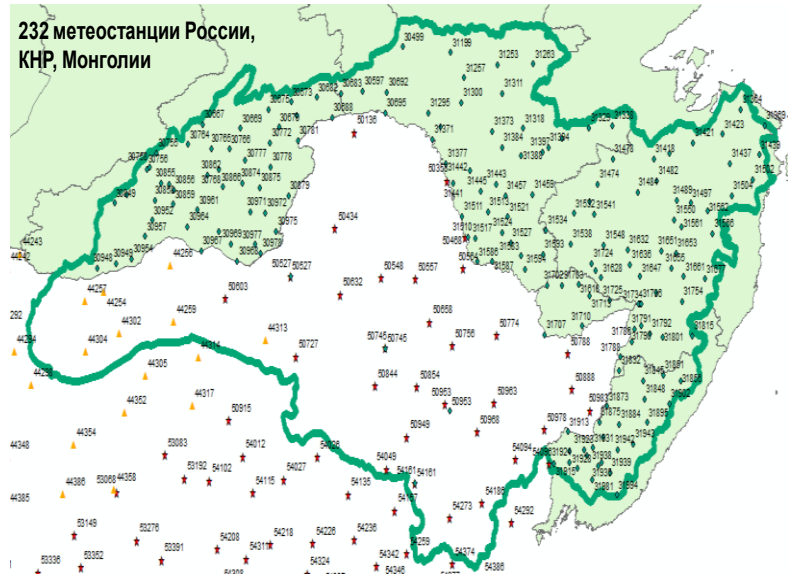
Данные метеорологии







# Пример моделирования полей гидрологических переменных в бассейне р. Амур



**Распределение расходов воды по речной системе р. Амур**

**Распределение высоты снежного покрова (вверху) и запаса воды в почве (внизу) в 2012-2013 гг.**



## Резюме

1. Национальная гидрологическая моделирующая система разрабатывается в составе Консорциума «Суша: мониторинг и адаптация» как элемент Адаптивной системы гидрологического мониторинга, необходимый для расширения информационного содержания, улучшения пространственного и временного разрешения данных мониторинга.
2. НГМС разрабатывается на платформе ЕСОМАГ – единственной на сегодня отечественной гидрологической модели, используемой в системе Минприроды РФ для информационной поддержки принятия решений в области водной безопасности на федеральном уровне
3. Разработаны автоматизированные средства и веб-технологии информационного обеспечения НГМС.
4. Получены удовлетворительные результаты тестирования вычислительного ядра НГМС на 10-ти пилотных речных бассейнах, подверженных климатообусловленным рискам

# Развитие НГМС в 2024 году и на втором этапе ВИПГЗ

## Завершение I этапа (2024 год)

Создание базы сеточных данных реанализа гидрологических характеристик (водного режима рек, снежного покрова, влажности и глубины промерзания почвы и др.) за период инструментальных наблюдений на основе гибридизации данных расчетов НГМС с данными наблюдений Государственной наблюдательной сети (Росгидромет)

## II этап ВИПГЗ "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ"(2025-2013 гг)

1. Развитие НГМС и дополнение ее следующими моделями:
  - 1.1 Модели эмиссии углекислого газа с поверхности крупных рек России в атмосферу.
  - 1.2 Модели переноса углерода в океан крупными реками на территории РФ.
  - 1.3 Модели потоков углекислого газа и метана на поверхности крупных озер и водохранилищ России в атмосферу.
2. Создание баз расчетных данных потоков основных климатически активных веществ (углекислого газа и метана) в пилотных водных объектах на территории Российской Федерации

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**



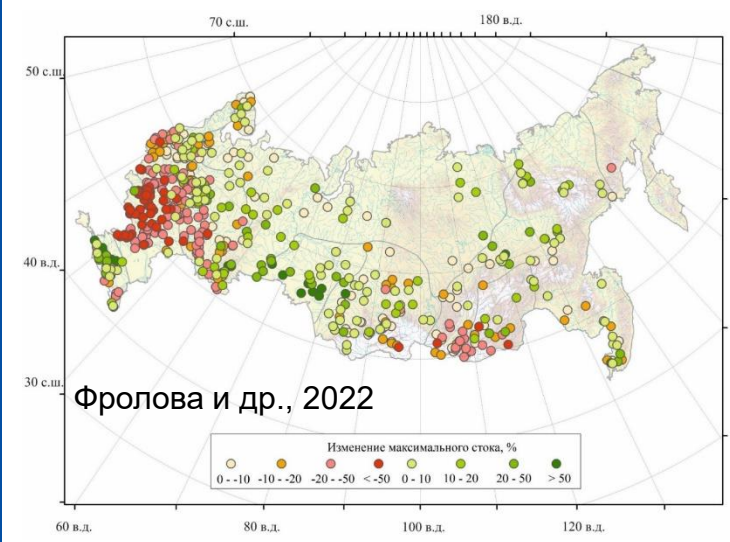
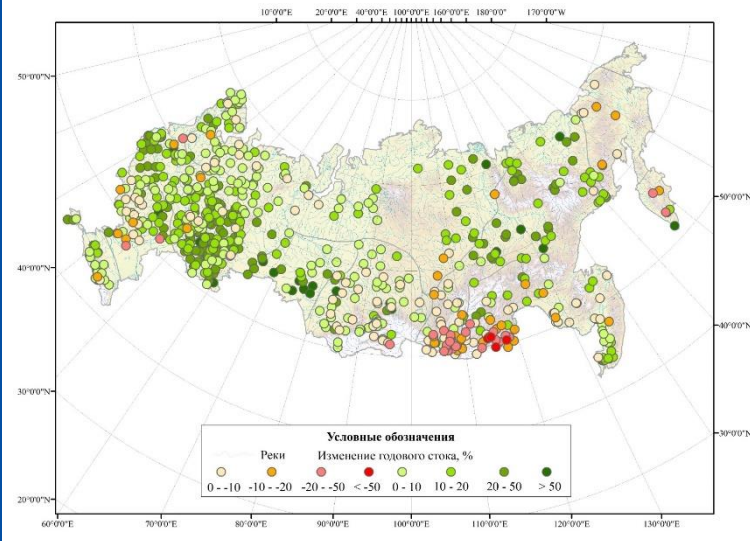


# Изменения климата и угрозы водной безопасности

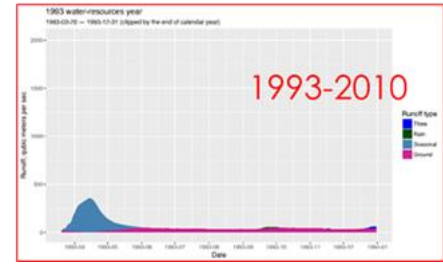
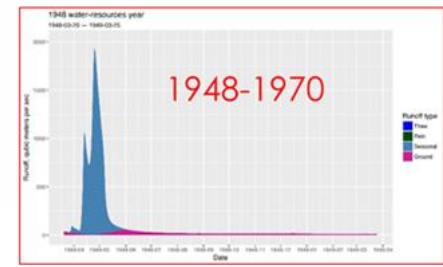


# Изменения климата и угрозы водной безопасности в РФ

- 1. Углубление дефицита водных ресурсов, повторяемости гидрологических засух (маловодий) на юге Европейской России, включая Нижний Дон и Приазовье, Нижнюю Волгу, отдельные районы Северного Кавказа.** (При этом Краснодарский и Ставропольский края, Республика Дагестан и Карачаево-Черкессия, Ростовская область - в первой десятке наиболее водоемких регионов России), в бассейнах основных притоков озера Байкал. Усиление неравномерности распределения водных ресурсов по территории РФ.
- 2. Рост максимального стока в паводкоопасных регионах страны, включая реки Северного Кавказа (до 50%), среднюю Кубань (на 30-40%), большинство рек Азиатской части страны, в т.ч. реки Алтая, Приморья.**
- 3. Перестройка сезонного водного режима рек Европейской России** – снижение максимального стока весеннего половодья наряду с ростом низкого летнего и зимнего речного стока. В весенний период все чаще наблюдается дефицит воды, раньше наступает продолжительный меженный период, характеризующийся значительным дефицитом.



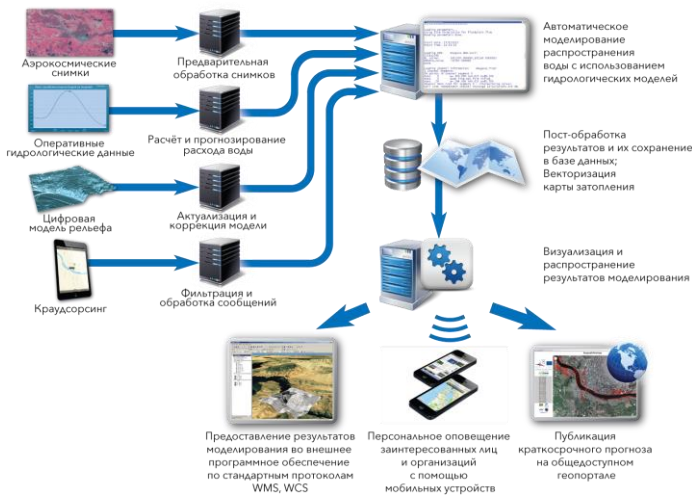
Фролова и др., 2022





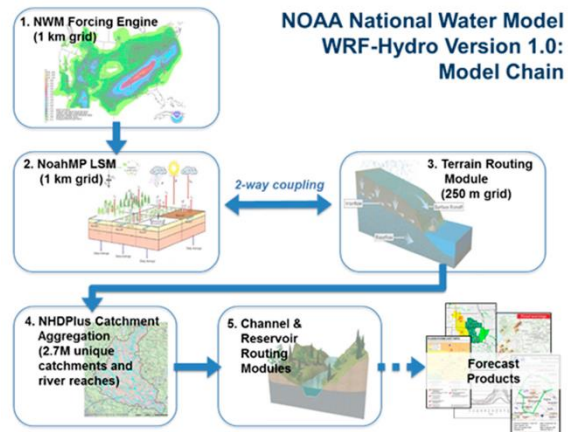
# Об актуальности создания НГМС как средства поддержки адаптационных мероприятий

Информационная обеспеченность и обоснованность адаптационных мероприятий по противодействию угрозам водной безопасности в меняющихся климатических условиях связаны с развитием отечественной адаптивной сети гидрологического мониторинга (АСГМ)

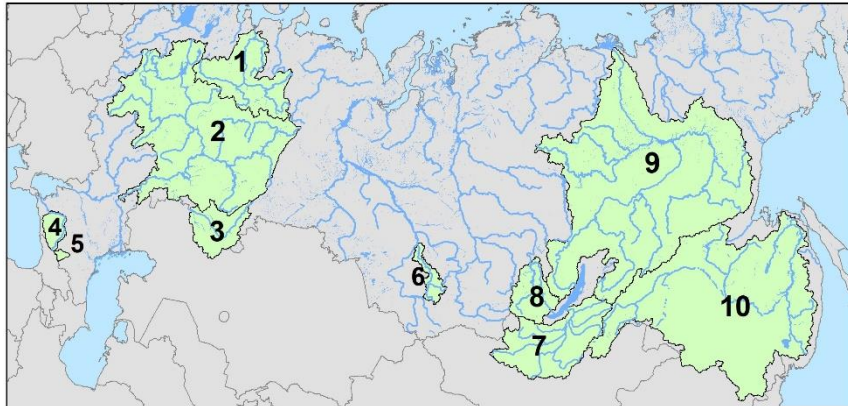


**Необходимый компонент развития АСГМ - гидрологические моделирующие системы (ГМС), обеспечивающие расширение информационного содержания мониторинга путем гибридизации данных наблюдений с данными гидрологического моделирования и получения на этой основе данных сетевого гидрологического реанализа, в том числе, для водосборов с недостатком наблюдений.**

ГМС включают физически обоснованные модели гидрологических процессов, технологии передачи, обработки и хранения оперативной и архивной гидрометеорологической информации, данных о параметрах подстилающей поверхности. **В экономически развитых странах уже не первый год ведется разработка национальных ГМС в структуре систем гидрологического мониторинга для территорий этих стран. Задача разработки отечественной ГМС становится в условиях современных вызовов особенно актуальной.**



# Результаты тестирования вычислительного ядра НГМС на пилотных речных бассейнах



## 1. Пилотные речные бассейны подвержены значимым климатическим рискам

Согласно выводам Третьего *оценочного доклада Росгидромета* об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации и другим публикациям ведущих отечественных специалистов, *в пилотных речных бассейнах уже происходят (и прогнозируются) значимые изменения водного режима*

## 2. Результаты, полученные по пилотным речным бассейнам, могут быть распространены на другие водные объекты территории страны.

Пилотные речные бассейны расположены в развитых в экономическом отношении регионах страны, покрывают значительную часть территории страны (7.3 млн. км<sup>2</sup> или 43% площади РФ) и на их территориях проживает 52% населения Российской Федерации. Поэтому *выбранные речные бассейны могут служить индикаторами угроз водной безопасности на федеральном уровне и стать тестовыми объектами для выработки общих подходов по адаптации водохозяйственной отрасли страны к изменению климата.*

## 3. Наличие трансграничных речных бассейнов, Среди выбранных пилотных бассейнов – три трансграничных: Амур, Урал, Селенга.

# СОКРАЩЕНИЕ СЕТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РОСГИДРОМЕТА

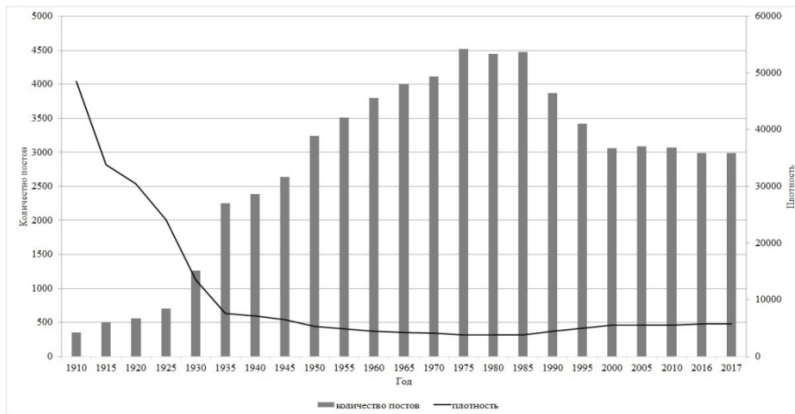


Рис. 1. Динамика численности гидрологической сети РФ за период 1910 - 2017 годы

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



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

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

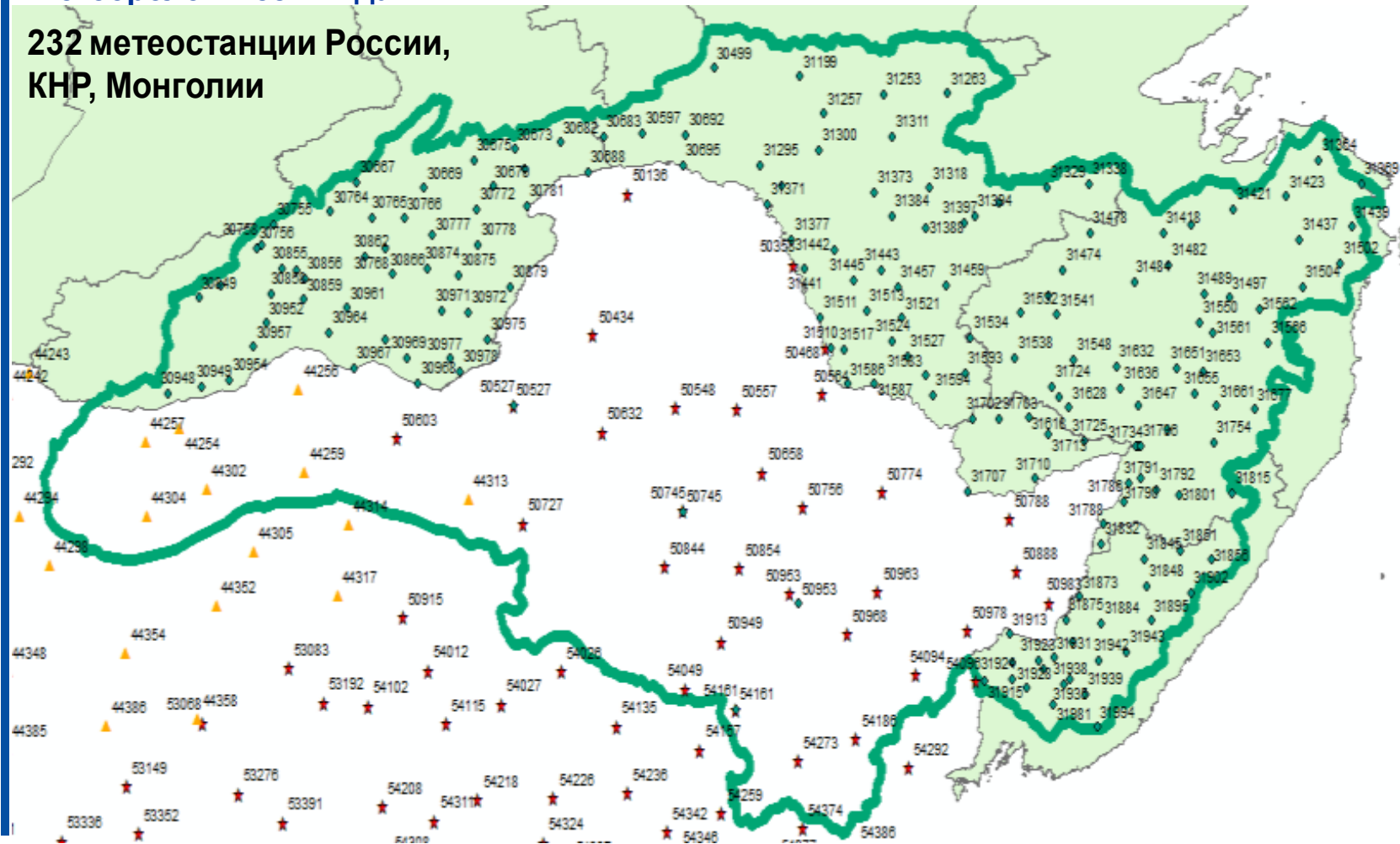
**Уменьшение плотности наблюдательной сети (среднее расстояние между пунктами наблюдений намного больше характерных пространственных масштабов гидрологических процессов)**

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

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

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

**232 метеостанции России, КНР, Монголии**





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

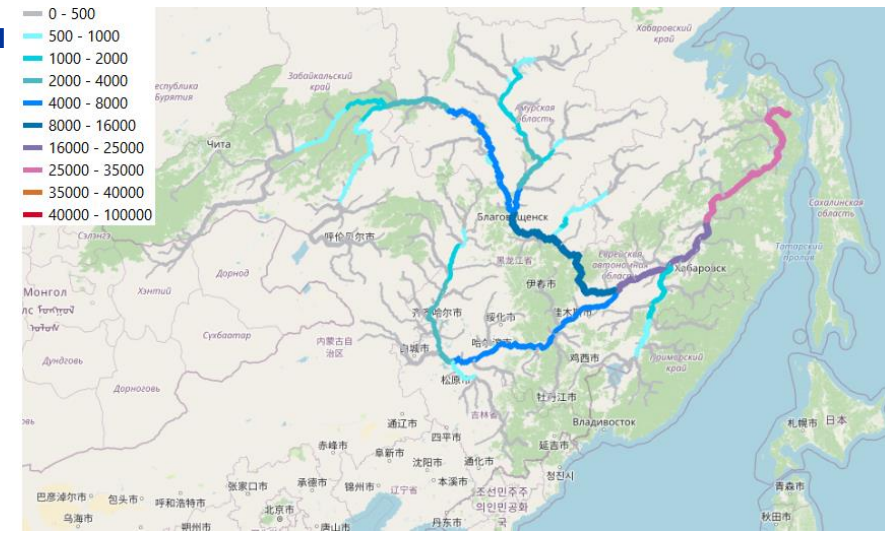
01.08.2013



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



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



**Распределение расхода воды по речной сети**



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**1. Для речных бассейнов России, а также отдельных паводкоопасных территорий, разработаны доведены до технологического уровня моделирующие комплексы, основанные на физико-математических моделях гидрологических процессов. Возможности применения для бассейнов России развитых зарубежных технологий ограничены, т.к. в большинстве случаев, они разрабатывались для отличающихся от российских условий формирования речного стока и опираются на отличающуюся по составу и точности исходную информацию.**

**2. Повышение требований к обеспечению водной безопасности диктует необходимость разработки для основных речных бассейнов России отечественной экспертной геоинформационной моделирующей системы как основы для модернизации существующих методов гидрологических расчетов и прогнозов, источника дополнительных данных гидрологического мониторинга.**

Представленные в презентации материалы – результат многолетних совместных работ автора с ведущими учеными и молодыми специалистами отдела гидрологии речных бассейнов ИВП РАН: **д.г.н. Ю.Г. Мотовиловым, д.г.н. Б.И. Гарцманом, д.т.н. В.В. Беликовым, к.г.н. А.С. Калугиным, к.г.н. В.М. Морейдо, к.г.н. Т.Б. Фащевской.** Автоматизированная система гидрологического моделирования в бассейне Амура создана совместно со специалистами ДВНИИГМИ **к.т.н. А.Н. Бугайцом и Л.В. Гончуковым**

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ**











# ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА КАСКАДАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА КАСКАДАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ



Схема принятия решений при управлении Волжско-Камским каскадом водохранилищ

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

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

