



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **О технологическом контенте**
системы фонового
прогнозирования стока

Исполнитель _____ Южно Артем Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ К.г.н, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Тимофеева Лариса Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

_____ (подпись)

К.г.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сикан Александр Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«7» июня 2018 г.

Санкт-Петербург,
2018

ВВЕДЕНИЕ

Из всех стихийных бедствий наводнения на реках занимают первое место по суммарному среднегодовому ущербу. При этом анализ климатически обусловленных изменений частоты (повторяемости) наводнений за последнее столетие свидетельствует, что во всем мире наблюдалась тенденция роста ущерба от наводнений на реках. Суммарно число опасных гидрологических явлений (преимущественно наводнений) за первое десятилетие XXI в. в России выросло в 1,5 раза по сравнению с 1990-ми гг., этим стихийным бедствиям подвержены около 500 тыс. км², наводнениям с катастрофическими последствиями – 150 тыс. км², где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий, а среднегодовой ущерб от них оценивается примерно в 40 млрд рублей [1].

Немаловажно и то, что в РФ из около 2,6 млн водотоков, подавляющее большинство в гидрологическом отношении относятся к категориям «малоизученные» или «не изученные». На их водосборах проживает около трети населения страны, располагается значительное количество предприятий добывающей отрасли, промышленности. Поэтому своевременное прогнозирование опасных гидрологических процессов и явлений, особенно на неизученных территориях, всегда будет оставаться важной практической задачей для гидрометеорологической науки РФ.

Выработка такой системы на уровне страны – задача *актуальная*, в ней заинтересован Росгидромет, в Государственном гидрологическом институте данный вопрос обозначен как один из приоритетных в концепции развития ведомства.

На данный момент в РФ система прогнозирования базируется на методиках, разработанных в середине-конце XX в. и направленных на получение конкретного прогнозного значения гидрологической характеристики в створе. Прогнозы такого рода требуют значительных ресурсов – трудовых, административных, операционных, технических.

Очевидно, что если на локальном уровне в паводкоопасных районах возможно разработать и реализовать соответствующие методики, то на обширных неизученных территориях главной проблемой при моделировании и прогнозировании паводков становится дефицит оперативных исходных данных, их точность и заблаговременность.

Система же фоновое прогнозирование стока (ФПС), которое можно назвать скорее качественным, способна обеспечить общенациональный охват и высокий уровень гибкости перераспределения ресурсов, необходимых для прогнозирования паводков и принятия оперативных превентивных мер. Она оптимальна и с точки зрения затраты всех вышеперечисленных ресурсов.

Целью магистерской диссертации является составление технологической цепи системы фоновое прогнозирование стока и выработка практических рекомендаций по ее внедрению на территории РФ. Для достижения цели требуется методично и последовательно решить следующие *задачи*:

- Ознакомиться с проблематикой ФПС на территории РФ, международной практикой по данному вопросу; изучить действующие отечественные и зарубежные методики прогнозирования быстроразвивающихся паводков, стока весеннего половодья.
- Изучить вопросы сбора и ассимиляции необходимых для моделирования данных: источники, дискретность, особенности обработки, визуализации. Особое внимание уделить данным, получаемым в режиме реального времени (спутниковые, георадарные).
- Выполнить аналитический обзор имеющихся моделей прогнозирования паводочного стока, стока весеннего половодья и связанных с ними мезомасштабных метеомоделей.
- Выполнить наглядный расчет прогнозных значений гидрологической характеристики в режиме близкому к реальному времени;
- Разработать систему оперативных связей в системе «данные-модели-прогнозирование-визуальное представление результатов».

Научной новизной данной работы является расчет значений эвапотранспирации с дискретностью 1 день и менее на примере общедоступных на территории РФ данных по метеостанции п. Красная Поляна. В дальнейшем это позволит сформировать целостный массив данных, необходимых для программного комплекса MLCM3 для прогнозирования с её помощью быстроразвивающихся паводков на р. Мзымта – п. Красная Поляна. Именно сложная процедура подготовки данных и их конвертации, высокие требования к ним, до сих пор не позволяли использовать такие эффективные зарубежные гидродинамические модели как Sacramento и разработанные на ее основе модели семейства MLCM на примере данных, предоставляемых гидрометеорологической сетью РФ. Заблаговременность такого прогноза, близкого к реальному времени, в перспективе может составить 3-4 часа, что соответствует высоким международным стандартам.

Объектом исследования являются наводнения как гидрометеорологическое явление и системы ФПС, позволяющие прогнозировать их развитие; *предметом* – инструменты, задействованные в соответствующих процедурах системы прогнозирования.

СОКРАЩЕНИЯ

CRED	-	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
ФП	-	Фоновое прогнозирование (фоновое прогнозирование
(ФПС)	-	стока)
ОГЯ	-	опасные гидрологические явления
NRT	-	Near Real Time
FFG(S)	-	Flash Flood Guidance (System)
HRC	-	Hydrologic Research Center
FWS	-	Flood Warning System
НППС	-	национальная противопаводковая система
ЦМР	-	цифровая модель рельефа
NWP	-	Numerical weather prediction
ОГП	-	оперативный гидрологический пост
ОК	-	осадкоомерный комплекс
АМК	-	автоматический метеорологический (гидрологический)
(АГК)	-	комплексы
ССПД	-	космическая система сбора и передачи данных
ДЗ	-	диапазон зондирования
БПЛА	-	беспилотные летательные аппараты
WRF	-	Weather Research and Forecasting Model
SWAT	-	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-	-	Water Assessment Tool-Variable Source Area
VSA	-	
ALADIN	-	Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International
COSMO	-	Consortium for Small-scale Modelling
HIRLAM	-	High Resolution Limited Area Model
GLORIAD	-	Global Ring Network for Advanced Application Development
VIC	-	Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic

Model

- AWBM - The Australian Water Balance Model
- SIMHYD - Simplified Hydrograph Model
- PDM - Probability Distribution Model
- SMAR - Soil Moisture Accounting Runoff Model
- MLCM - Multi-Layer Conceptual Model
- СУБД - Системы управления базами данных

I. НАВОДНЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ФПС

1.1 Генезис наводнений

Наводнения на реках России могут быть вызваны прохождением высокой волны весеннего, весенне-летнего или летнего половодья, дождевого или снегодождевого паводка редкой повторяемости, заторами и зажорами льда, а также совокупным действием перечисленных факторов, антропогенными факторами. На рисунке 1.1 представлено районирование территории РФ по генезису формирования наводнений, с учётом естественных причин.



Рисунок 1.1 – Территориальное деление РФ по генезису паводков и наводнений

Очевидно, для большей территории РФ характерны наводнения снегового генезиса. Продолжительность формирования высоких уровней воды при половодьях снегового генезиса – от нескольких суток до 1,5-2 месяцев в зависимости от таких факторов, как площадь и средний уклон

поверхности бассейна реки, его залесенность и заболоченность, характер почвенно-растительного покрова и ряда других факторов.

Наибольшую опасность половодья при обеспеченности расходов воды равной или меньше 10% представляют в бассейне р. Дон, а также междуречье Дона и Волги. Средняя степень опасности проявления катастрофических и опасных наводнений в период весенне-летнего половодья характерна для бассейнов Дона, Нижней Волги, Иртыша, Тобола. Умеренная степень опасности проявления катастрофических наводнений имеет место в бассейнах рек Западной Двины, Днепра, Оки, Верхней Волги, Камы, Оби, Енисея, Лены Яны, Анадыря, Колымы, Камчатки

Второй по числу зафиксированных явлений причиной возникновения паводков на территории РФ является интенсивное выпадение осадков. Такие паводки могут возникать на водосборах как равнинных рек, так и в горных, с той разницей, что на горных водосборах этот процесс будет быстроразвивающимся: от момента выпадения осадков до начала интенсивного подъема уровня воды в реке может пройти менее 1-3 часов, а потери на инфильтрацию, поверхностное задержание и испарение минимальны. Величина подъема уровня воды зависит, практически, только от объема выпавших осадков. На равнинных водосборах этот процесс более сложен и продолжителен: от момента выпадения осадков до начала подъема уровня воды в реке может пройти от нескольких часов до нескольких суток. Величина повышения уровня воды, помимо объема выпавших осадков, зависит от их интенсивности, от состояния почвенного слоя бассейна (его увлажнения) и запасов воды в речной системе [2].

Факторам формирования дождевых паводков являются:

- интенсивность выпадения осадков;
- увлажненность бассейна, предшествующая периоду выпадения осадков;
- водность реки;
- низкая пропускная способность русла реки;

- значительные уклоны поверхности водосбора;
- интенсивные эрозионные процессы, способствующие накоплению наносов в пойме и в устье реки;
- низкая водопроницаемость почв;
- многолетнее или сезонное промерзание грунтов.

Для всей территории России особую опасность представляют дождевые паводки редкой повторяемости на малых водосборах площадью менее 25-50 км². Процесс развития паводка на столь незначительных площадях стремителен, что максимально осложняет прогностическую процедуру.

Наибольшую опасность дождевые осадки представляют в Приморском крае и на Северном Кавказе.

В данной работе дождевому типу формирования наводнений уделено особое внимание ввиду его актуальности, поэтому есть смысл рассмотреть и более узкую классификацию, разработанную А.Н. Бефани для дождевых паводков (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Макрорегионы РФ по генезису паводков

Территории, обладающие той или иной генетической структурой паводка, к которым можно применять единые региональные математические модели формирования паводков, А.Н. Бефани назвал областями или макрорегионами паводочного стока [3]:

1 – безлесные или частично залесенные территории с глубоким стоянием уровня грунтовых вод и хорошо расчлененным рельефом; потери дождевых вод определяются прежде всего впитыванием в почво-грунты;

2 – плоские слаборасчлененные равнины (плато, низменности); потери обусловлены поверхностным задержанием и впитыванием;

3 – территории с высоким стоянием уровня грунтовых вод; потери эквиваленты слою осадков на неподтопленной площади;

4 – территории смешанного стока – подпёртый слой низменностей и синхронную ему долю ливневого стока с возвышенностей;

5 – равнинная тундра с высокой степенью естественной регуляции стока; потери складываются из поверхностного задержания и затрат на восполнение ранее освобожденных почвенных емкостей;

6 – микрорегион со сложным генезисом паводков, включающих в себя ряд форм равнинного и горного притока воды в русловую сеть;

7 – лесистые горы со сложным генезисом паводков; потери паводочного стока – инфильтрация в подстилающий относительный водоупор и почвенное задержание;

8 – горная тундра с чертами 5-го и 8-го макрорегионов.

1.2 Районирование по опасности развития паводков

Имеющиеся в литературе сведения о распределении на территории России опасных наводнений, предлагаемых критериях их опасности, приведены публикациях [4, 5].

Из всех стихийных бедствий наводнения на реках занимают первое место по суммарному среднегодовому ущербу. При этом анализ климатически обусловленных изменений частоты (повторяемости)

наводнений за последнее столетие свидетельствует, что во всем мире наблюдалась тенденция роста ущерба от наводнений на реках и за XX в. в мире погибло во время наводнений около 10 млн. человек. Эта печальная статистика свойственна и для России.

Среднегодовой ущерб от наводнений на территории РФ оценивается примерно в 40 млрд руб., в том числе в бассейнах рек Волга – 9,4 млрд руб., Амур – 6,7 млрд руб., Обь – 4,4 млрд руб., Терек – 3 млрд руб., Дон – 2,6 млрд руб., Кубань – 2,1 млрд руб., Лена – 1,2 млрд руб., озеро Байкал – 0,9 млрд руб., прочих рек – 10,7 млрд руб. [1].

Наиболее часто наводнения происходят на юге Приморского края, в бассейне Средней и Верхней Оки, Верхнего Дона, Кубани и Терека, Тобола, на притоках Среднего Енисея и Средней Лены. Мощные снеговые и дождевые паводки возникают на крупных российских реках почти ежегодно (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Территориально деление РФ по максимальному превышению уровней начала затопления

Основываясь на исследованиях ФГБУ «ГГИ» [6], Института водных проблем РАН [7, 8], имеющихся в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» материалах, учитывая генезис наводнений и плотность населения, на территории России по степени опасности и причиняемому ущербу можно выделить несколько районов:

1) Густонаселенные территории предгорий Кавказа, бассейна р. Дон и его междуречий с Волгой с плотностью населения свыше 100 тыс. человек на 1 км². Катастрофические и опасные наводнения в период весеннего и весенне-летнего половодьем смешанного генезиса. Интенсивный выход воды на пойму отмечается раз в 5 лет, а при максимальных расходах 1% вероятности с 7-кратным превышением средних многолетних максимальных расходов воды может сформироваться катастрофическое наводнение с нанесением очень значительного ущерба.

2) Горные и предгорные районы Северного Кавказа, рек бассейна Амура, Западных и Восточных Саян. Генезис катастрофических и опасных наводнений – дождевые, со смешанными паводками и селевыми потоками. Интенсивный выход воды на пойму наблюдается раз в 20 лет, а максимальные расходы 1% вероятности превышают их средние многолетние значения в 5-10 раз. Отсутствие надежной системы прогнозирования и быстрота развития паводков приводят, как правило, к значительному материальному ущербу.

3) Предгорья Урала, Алтая, водосборы рек юга Западной Сибири с плотностью населения в среднем менее 25 человек на 1 км². Опасность развития катастрофических паводков представляют высокие весенние и весенне-летние половодья смешанного генезиса. Интенсивный выход воды на пойму наблюдается раз в 10 лет, а при 1% вероятности может сформироваться половодье, максимум которого в 5 раз превысит средний многолетний максимальный расход.

4) Центральные и северные районы ЕТР, Восточной Сибири и Северо-Востока, Камчатки. Риск развития катастрофических и опасных наводнений в

период весеннего половодья на реках с площадью водосбора более 50 тыс. км². Максимальные расходы 1% вероятности, усложняются заторами льда и продолжительность затопления пойменных участков может составлять от 12 до 24 суток, а максимальные расходы могут превышать их средние многолетние значения в 2 раза.

5) Реки Сибири и Севера ЕТР, особенно в местах выхода рек из гор на равнину. Катастрофические наводнения обусловлены ледовыми заторами и зажорами. Иногда катастрофические наводнения при ледовых заторах формируются и в южных районах страны (например, в Краснодарском крае в 2002 г.).

6) На всей территории России большую опасность представляют дождевые паводки редкой повторяемости на водосборах площадью менее 25-50 км². Они приводят к затоплению в летне-осенний период сельскохозяйственных угодий, объектов частной собственности и промышленности, нанося тем самым значительный материальный ущерб и снижая урожайность или приводя к гибели сельскохозяйственных культур.

На большинстве рек России площадью водосбора более 10 тыс. км² вероятность формирования опасных и приносящих значительный ущерб подтоплений высока, что выражается в средней повторяемости катастрофических наводнений практически в любом прибрежном крупном городе страны раз в 8-12 лет. В таких городах как Барнаул, Бийск (предгорья Алтая), Орск, Уфа (предгорья Урала) частичное затопление наблюдается чаще, раз в 2-3 года. В последние годы опасные наводнения с большими площадями затопления и продолжительным стоянием воды участились. Так, только в 2001 г. значительный ущерб экономике страны был нанесен одновременно в бассейнах рек Лены, Ангары, в Краснодарском крае. Обусловлено ли это климатическими изменениями или нет – вопрос для дискуссии в следующей подглаве.

1.3 Повторяемость и связь с климатическими изменениями

Анализ созданных в ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД» баз данных гидрологических наблюдений и опасных гидрологических явлений на реках России за период 80-х годов XX в. и начала XXI в. свидетельствует о том, что последствия изменений климата не однозначно сказались на изменениях максимальных расходов воды на реках разных климатических поясов [9]. Среднепогодное территориальное распределение повторяемости опасных паводков и половодий представлено на рисунке 1.4.

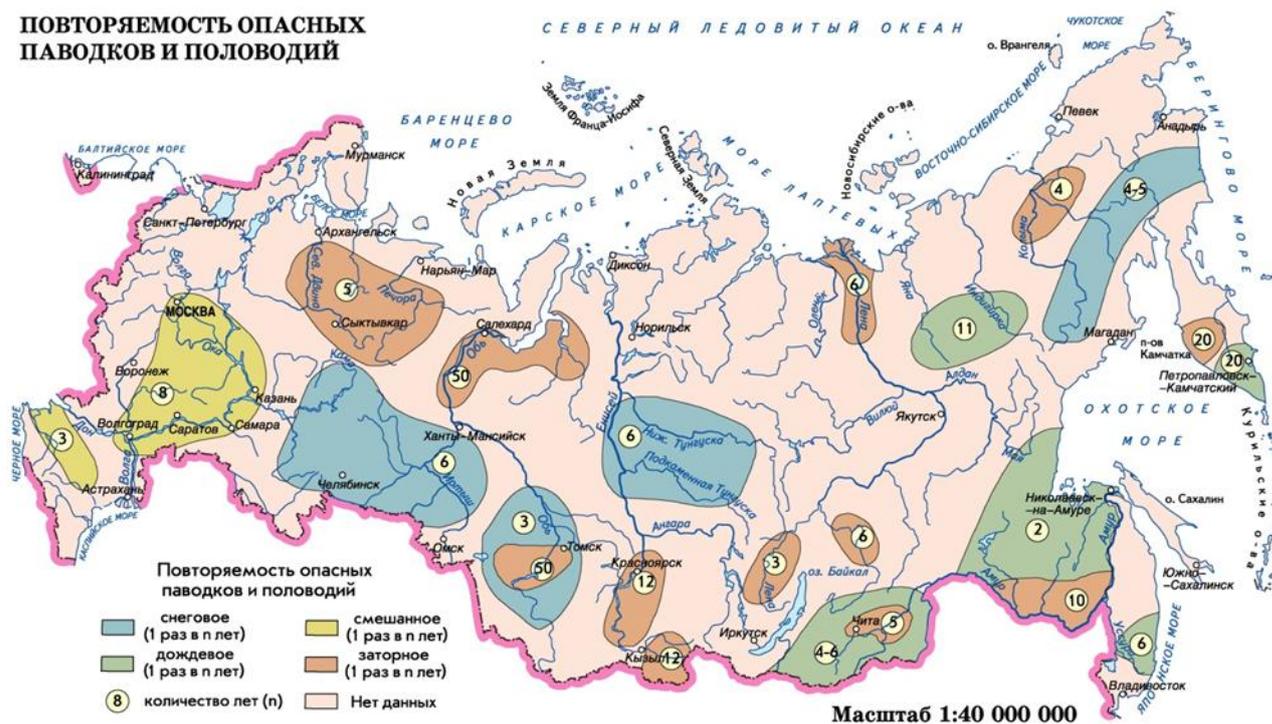


Рисунок 1.4 – Территориальное деление РФ по повторяемости опасных паводков и половодий

Далее будет рассмотрен вопрос повышения повторяемости наводнений различного генезиса и ее связи с изменениями метеорологических факторов под воздействием климатических изменений. Современные изменения климата на территории России проявляются в увеличении его экстремальности, региональными гидрометеорологическими последствиями которой являются изменения рисков повторяемости опасных наводнений любого генезиса. Также исследования зафиксировали увеличение значений максимальных расходов воды в районах Северного Кавказа (бассейны рек

Терека, Кубани) и среднегорных и низкогорных частях Восточной Сибири (где сток формируется в нескольких высотных поясах), практически всей Западной Сибири, Дальнего Востока. На Европейской территории РФ (помимо упомянутых выше регионов) показатели максимального стока либо неизменны, либо уменьшаются. Оценка количества случаев опасных ливней и вызванных ими паводков и половодий представлена на рисунке 1.5 [9].

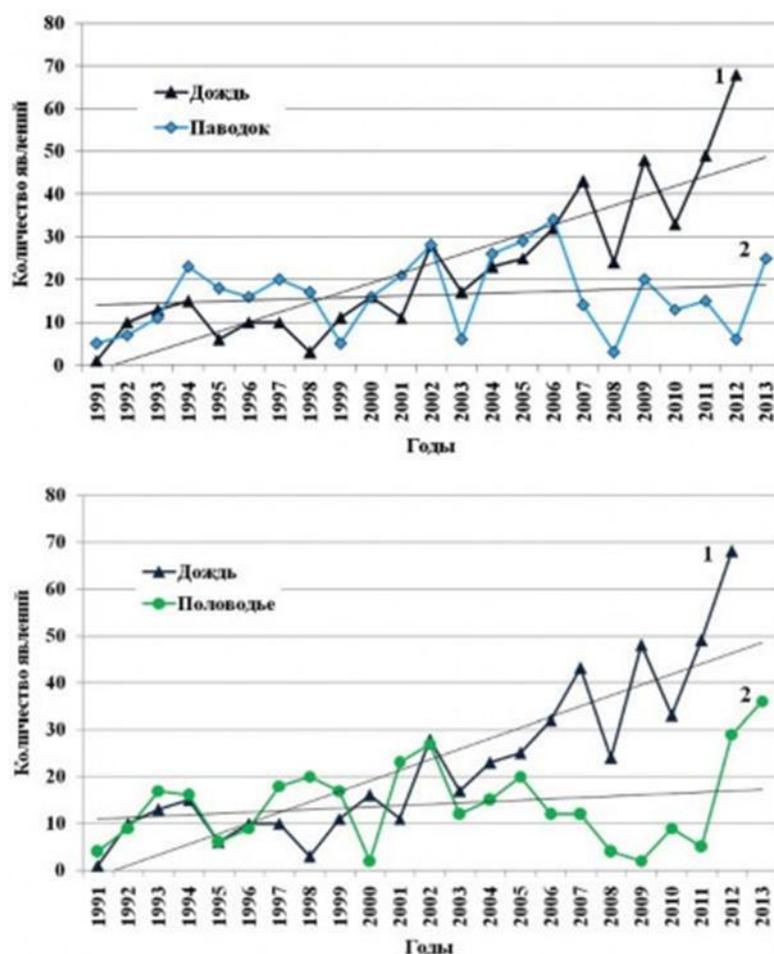


Рисунок 1.5 – Число опасных ливней и вызванных ими паводков и половодий

Несложно отметить тренд на увеличение числа случаев опасных дождей и менее очевидный тренд на увеличения числа случаев вызванных ими паводков и половодий. Основываясь на выводах, представленных в [9] география распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений на реках России и, основываясь на климатическом районировании территории СССР, предложенном Б.П. Алисовым [10], на территории России можно выделить

несколько районов, наиболее чувствительных к изменениям климата с точки зрения частоты и продолжительности опасных наводнений на реках:

– Территория Дальневосточной климатической области, где наиболее выражено повышение частоты и продолжительности опасных наводнений в периоды летне-осенних половодий, дождевых и снеgadoждевых паводков на реках Дальневосточного ФО, особенно в бассейне р. Амур. При сохранении тренда на повышение температуры воздуха и количества выпадающих осадков возможно увеличение числа опасных гидрологических явлений (ОГЯ) гидрологического характера, особенно в северных районах и в районах деградации многолетней мерзлоты (Камчатский край, Чукотский АО, Магаданская область), а на реках бассейнов Лены, Яны, Индигирки, Анабар Восточносибирской климатической области возможно увеличение частоты заторных наводнений.

– Высокогорная климатическая область Сибири (Саяны, Алтай и Танну-Ола). В ее пределах ожидается увеличением частоты опасных наводнений при весеннем и весенне-летнем половодье, летних дождевых паводках с интенсивный выход воды на пойму раз в 10 лет, а в отдельные годы может сформироваться половодье, максимум которого в 5 раз превышает средний многолетний максимальный расход. В пределах области наиболее паводкоопасными территориями являются предгорья Алтайского края и Кемеровской области Сибирского ФО. Возрастает риск опасных дождевых паводков на реках Республик Алтай, Тыва, Хакасия, Бурятия, Забайкальского края, а при ледовых заторах – на реках бассейнов Енисея и Оби на территории Красноярского края, Новосибирской, Томской областей Западно-Сибирской климатической области.

– Северный Кавказ, Высокогорный Кавказ и Закавказье (российская часть Причерноморья и Прикаспия) – увеличение частоты наводнений при высоких дождевых паводках и паводках смешанного генезиса. Также ожидается увеличение повторяемости селевых потоков в Краснодарском и Ставропольском краях, всех республиках Северо-Кавказского и Южного ФО.

Сохраняется угроза опасных заторных наводнений в предгорьях и загорные в горах.

– Уральская климатическая область с наводнениями в период весеннего половодья и летних дождевых паводков на реках Южного Урала, Предуралья и Зауралья. Для рек Северного Урала ожидается увеличение частоты наводнений в период весеннего половодья. С сохранением трендов вся территорию Урала будет более подвержена опасным паводкам загорного генезиса.

– Северная климатическая область с наводнениями в период весеннего половодья, при заторных наводнениях и нагонах в морских и озерных устьях рек. Наиболее подвержены наводнениям Архангельская область и Республика Коми.

Если же рассматривать увеличение частоты повторяемости опасных наводнений в мире наиболее очевидный тренд на увеличении наблюдается на территории Европы (при этом обусловлен на 90% увеличением повторяемости наводнений в Восточной её части) [11, 12].

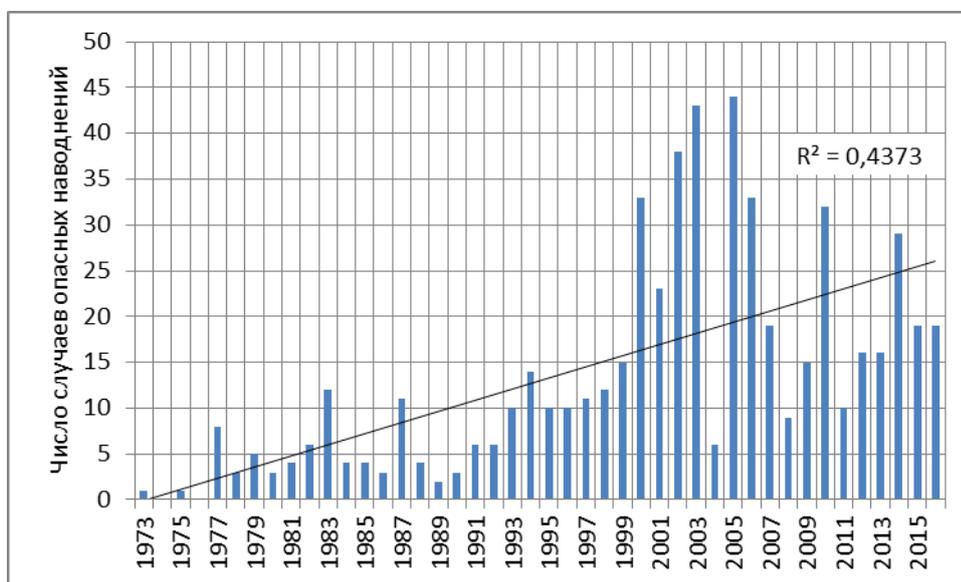


Рисунок 1.6 – Число случаев опасных наводнений в Европе по статистике CRED с 1973 по 2016 гг.

Всё вышеперечисленное в очередной раз подтверждает актуальность разработки системы своевременного прогнозирования последствий, которые

могут повлечь за собой опасные наводнения, и действенной системы оповещения о них.

II. ПРОБЛЕМАТИКА СИСТЕМ ФОНОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА

2.1 Общие понятия

Прежде чем говорить о системе ФПС, необходимо уточнить само понятие ФП. Согласно определению ВМО «фоновое моделирование стока в режиме близком к реальному времени – это полностью автоматизированная процедура, позволяющая рассчитать и отобразить общее состояние водотоков на сравнительно больших территориях, она исключительно удобна и эффективна для мониторинга опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и снижения риска катастрофических наводнений» [13].

На многих малых или же малоизученных в гидрологическом отношении водотоках фоновое прогнозирование (ФП) – это один из немногих, если не единственный, способ получить адекватную картину происходящего в общем чертах, на основании которой принимаются те или иные управленческие решения. Тем не менее ФП не ограничивается лишь качественным описанием гидрологической обстановки, точность и заблаговременность таких прогнозов должна быть достаточной для решения целого ряда прикладных задач, согласно которым выделены следующие виды ФП:

- выявление зон повышенного риска развития наводнения. Дается прогноз фактической ситуации в удаленных точках или в пунктах наблюдений, данные с которых поступают с опозданием [14];
- составление предварительных оценок ущерба. ФП развития того или иного гидрологического процесса и явления в удаленных точках в недалеком прошлом (для получения предварительных оценок ущерба, нанесенного наводнением);
- оптимизация действий по снижению ущерба от наводнения при помощи краткосрочных ФП;

- уточнение механизма процесса развития паводка при помощи ФП повышенной заблаговременности (привлечение дополнительных метеоданных, выбор наилучших моделей и т.д.).

Так, на малых водосборах, где паводки формируются в течение нескольких часов, повышенная заблаговременность может быть равна 1-2 суткам, для более крупных водосборных площадей «обычная» заблаговременность – 4-5 суток, повышенная – 6-7 суток. Важно подчеркнуть, что при этом категория прогноза с точки зрения заблаговременности не меняется.

Основной интерес с точки зрения ФПС представляют так называемые «Near-Real-Time (NRT) forecasts» – это фоновые прогнозы стока в режиме, близком к реальному времени. Прогнозирование же развития паводков в режиме реального времени исключено ввиду целого ряда факторов: время интегрирование измерений при резких колебаниях гидрологического параметра в единицу дискретности не равно нулю, время первичной и вторичной (анализ и контроль качества) обработки данных наблюдателем не равно нулю, наличие задержек под функционирование прогностической процедуры и нестыковок предоставленных наблюдателем дискретностей с требуемыми расчетными. Следовательно, даже в отсутствии каких-либо технических сбоев и неполадок, прогноз не может быть выпущен в режиме реального времени, а выходят с задержкой, которая в развитых странах исчисляется 2-3 часами [15]. Такого высокого показателя сумели достичь страны, гидрометеорологическая наука в которых получила наибольшее развитие – Австралия [16], Финляндии [17], Великобритании [18], США [19], Япония [20], страны ЕС [21]. Также такие системы разрабатываются в рамках международного сотрудничества, например, в рамках программы Flash Flood Guidance (FFG) были реализованы программы в Центральной Азии, Южной Африке, Южной Америке, в бассейне Черного моря, Юго-восточной Европе, Южной Азии, но заблаговременность ФП там лишь стремится к показателям развитых стран и достигает 5 часов [22]. Лимитирующим фактором развития

таких систем является пространственно-временная дискретность гидрометеорологических наблюдений. В тех странах, где она пока низкая (как в нашей стране), есть смысл озаботиться созданием таких автоматизированных систем хотя бы на локальном уровне.

Вопрос создания систем фоновое прогнозирование стока (ФПС) давно находится в фокусе внимания гидрометеорологических ведомств всего мира. Система ФПС – это структура, объединяющая посредством технологических связей все звенья, необходимые для качественного прогнозирования развития паводков, начиная от сбора данных и заканчивая моделированием паводков и налаживанием систем оповещением населения.

Исходя из определения, ниже будут рассмотрены только те системы, которые включают в себя следующие три технологических блока:

- 1) автоматизированная система получения и обработки данных, их архивирования и ассимиляции;
- 2) частично автоматизированная подсистема принятия противопаводковых мер, мониторинга и анализа имеющихся ресурсов, средства автоматизированной поддержки административных решений в условиях ЧС;
- 3) автоматизированная подсистема оповещения населения.

В наиболее общем виде систему ФПС можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 2.1.

Такие многоуровневые системы подразумевают слаженную совместную работу сразу нескольких ведомств (для России – Росгидромет, МЧС, администрации территориальных единиц и т.д.) и могут быть реализованы как на глобальном уровне, так и на локальном. Эффективность будет напрямую зависеть от оперативно-технических возможностей и проработки связей между различными звеньями цепи системы ФПС.

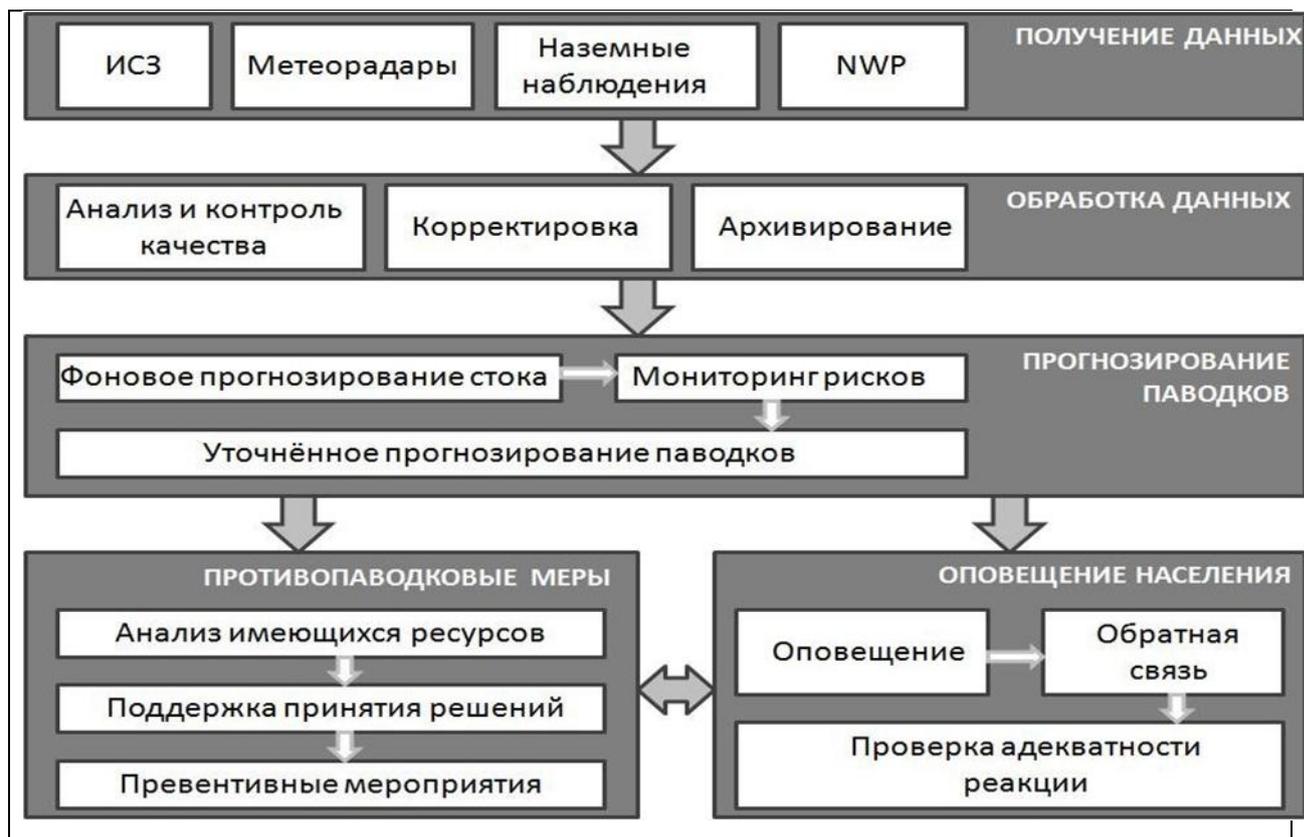


Рисунок 2.1 – Технологические блоки противопаводочной системы

Далее рассмотрим международный и отечественный опыт в разработке таких систем.

2.2 Международный опыт создания систем ФПС

Образцом подобной системы в мире является, прежде всего, Flash Flood Guidance (FFG) System, имеющая глобальный охват, разработанная по инициативе ВМО для различных регионов планеты и действующая с начала 1970-х годов. Данное руководство может внедряться на трех уровнях:

- 1) Глобальном (обеспечение оперативными мощностями, а также коммуникации в сфере получения данных в режиме реального времени в глобальном масштабе).
- 2) Региональном (сотрудничество на уровне научного обоснования методик).
- 3) Локальном (уровень страны; развитие местных данных высокой пространственно-временной дискретности, адаптация методов к местным физико-географическим условиям).

В рамках FFG ВМО реализовала локальные проекты в следующих регионах мира: Чёрное море и Средний Восток, Центрально-Азиатский регион, Центрально-Американский регион, Гаити и Доминиканская республика, Комиссия по реке Меконг, Мьянма, Северо-Запад Южной Америки, Южно-Африканский регион, Южно-Американский регион, Южно-Азиатский регион, Юго-Восточный регион (Азия-Океания), Юго-Восточная Европа, бассейн реки Зарумийа (Перу, Эквадор). Для всех этих регионов были разработаны 5 принципов внедрения системы: вводные региональные семинары, дистанционное обучение, специализированные тренинги в Hydrologic Research Center (HRC), региональное оперативное обучение, семинары по региональной оперативной устойчивости. Динамика развития по каждому из них в регионах представлена на рисунке 2.2.

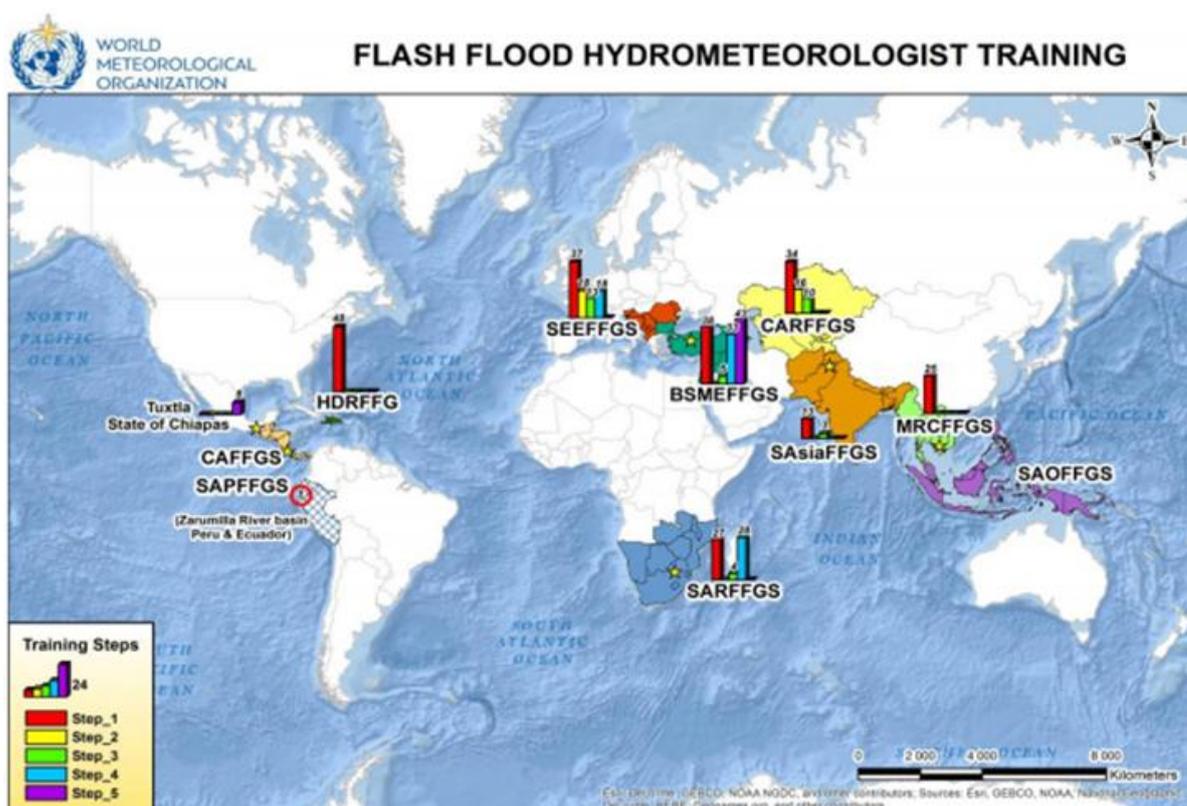


Рисунок 2.2 – Макрорегионы FFGS и динамика реализации системы в них

Базовыми принципами FFGS являются: сотрудничество на международном уровне в сфере обмена гидрометеорологическими данными в режиме реального времени, разработка региональных и локальных методик по прогнозированию быстроразвивающихся паводков, развитие устойчивых

и эффективных систем ФПС в регионах, объединение локальных данных в единые глобальные аналитико-информационные центры, формирование единых межрегиональных ГИС-систем, совместные усилия по предотвращению и ликвидации последствий катастрофических наводнений, сотрудничество в сфере поставок необходимых оперативных ресурсов, технических средств, развитие более тесных связей между гидрологией и метеорологией на всех уровнях. Принципиальная схема системы ФПС согласно FFGS представлена на рисунке 2.3.

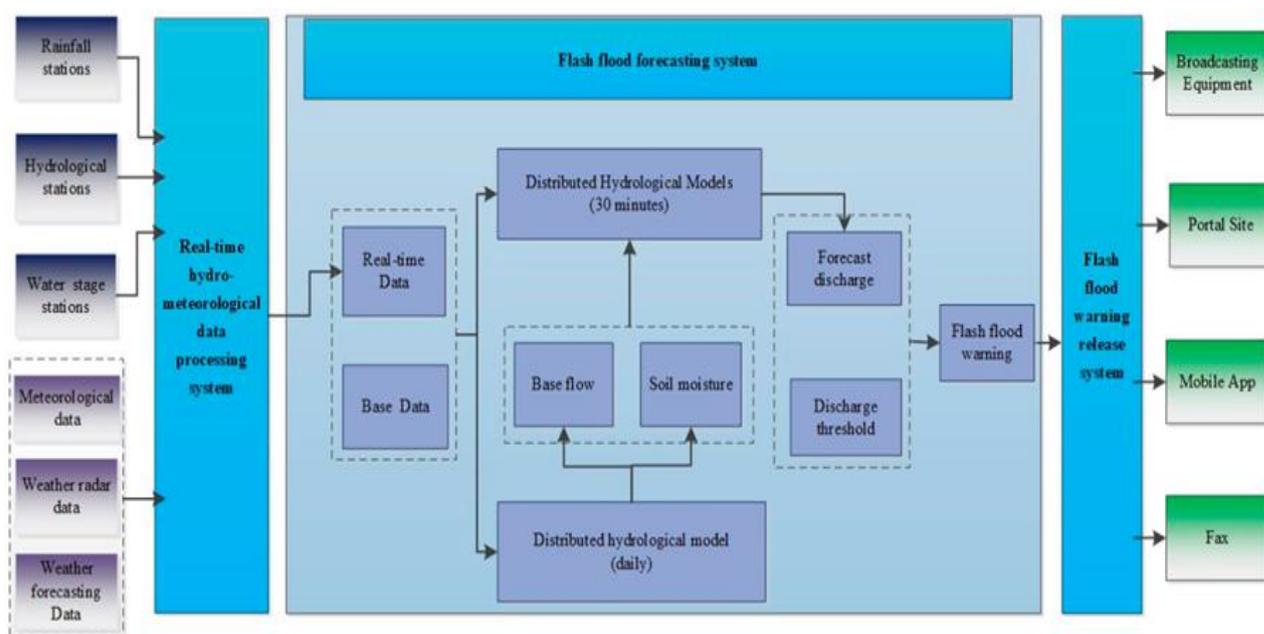


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема системы ФПС FFGS

О примерах успешного внедрения, практики применения подобных систем и достигнутых результатах (главным образом заблаговременности ФП паводков) упоминалось в начале главы.

Параллельно FFGS развиваются также и независимые региональные системы. Например, для гидрометеорологического обеспечения Олимпийских Игр в Пекине в 2008 г. Метеобюро Правительства Австралии разработало локальную систему ФПС, актуальную и по сей день. Ярким примером эффективных локальных систем ФПС могут являться Чрезвычайные планы по борьбе с риском наводнений (Emergency Plan against Flood Risk), действующие для каждой провинции Испании с учетом повторяемости паводков и высоты затопления при их прохождении. В

соответствии с этим планом процесс развития паводков разбит на три фазы: pre-emergency (предкритическая), emergency (критическая), normalization (фаза нормализации), а сферы ответственности ведомств четко разграничены. [23]. Руководство по составлению подобных планов изложено Министерством Окружающей среды Великобритании [24].

Передовым в сфере функционирования системы ФПС можно считать опыт США, на территории которых система ФПС действует регионально с 1952 г., а с 70-80-х и по сей день – на общенациональном уровне (Flood Warning System – FWS). FWS включает в себя:

- подсистемы автоматизированного сбора, передачи, накопления и первичной обработки информации о состоянии водных объектов на региональном уровне;
- системы передачи информации в региональные прогностические центры;
- прогностическую продукцию на основе современных гидрологических моделей;
- подсистемы автоматизированного доведения прогнозов и предупреждений до ответственных ведомств.

Отличительной чертой, преимуществом FWS над другими аналогичными системами, является широкое внедрение методов дистанционного зондирования подстилающей поверхности с ИСЗ. На современном этапе система функционирует практически без вмешательства человека. Здесь также стоит отметить взаимодействие со страховыми компаниями и создание Национальной федеральной программы страхования от наводнений (National Flood Insurance Program, NFIP). В РФ подобной практики нет, и практически все бремя от последствий прохождения наводнения ложится на федеральный бюджет, специальные фонды, а все дискуссии на эту тему сводятся к полному запрету строительства на пойменных территориях.

На примере Нигерии [25] можно убедиться в том, что даже не имея достаточного количества собственных ресурсов можно создать систему ФПС с помощью продуктивного сотрудничества на самых разных уровнях (смотрите рисунок 2.4).

В Саудовской Аравии в схему системы ФПС активно внедряются ГИС-технологии с прямым доступом к данным спутниковых наблюдений, заблаговременность ФП в стране приближается к уровню развитых стран [26].

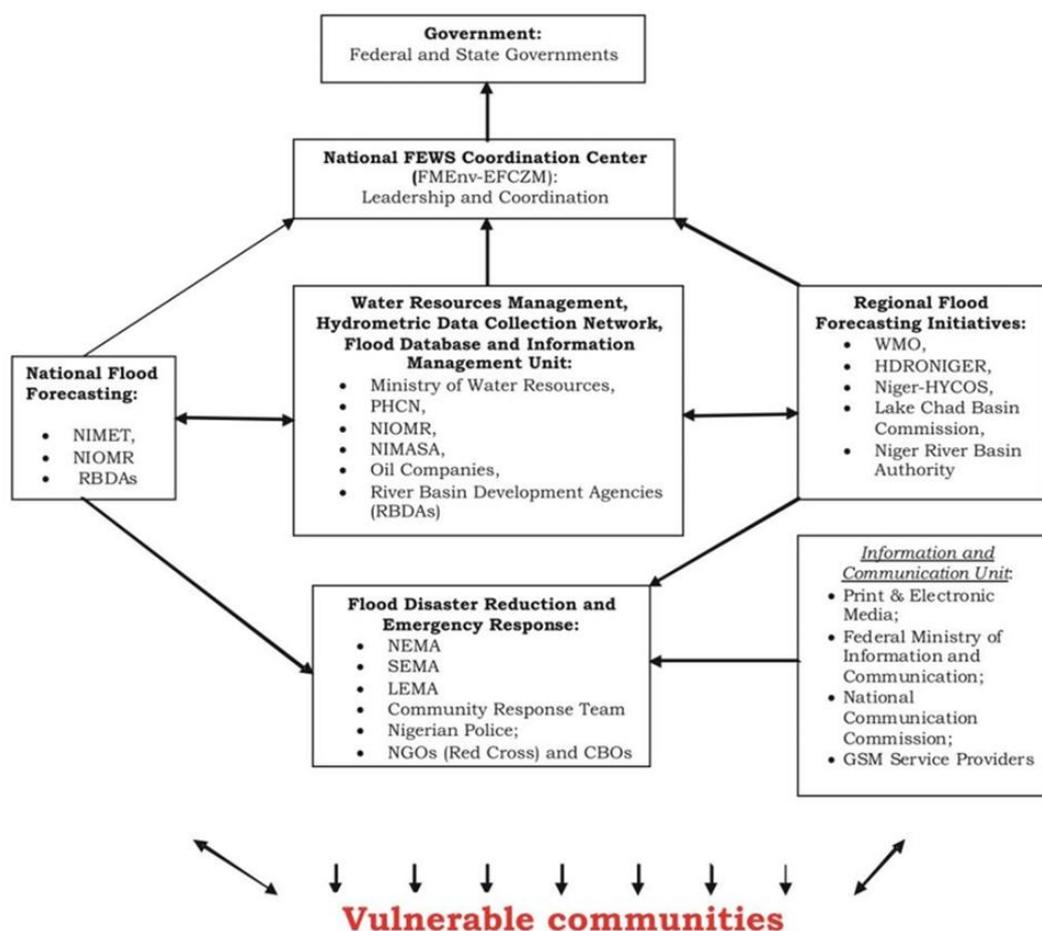


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема системы ФПС FFGS

Зарубежный опыт демонстрирует высокую компетенцию в вопросах ФП, даже в странах, чей экономический уровень и уровень развития довольно низок. Тем не менее далеко не все звенья цепи и методики применимы и могут быть адаптированы на территории РФ, об этом пойдет речь в следующей подглаве.

2.3 Отечественная практика

На данный момент в РФ практику применения фонового прогнозирования никак нельзя назвать широкой, а скорее точечной, хотя для нашей страны именно этот вид прогнозирования имеет множество конкурентных преимуществ, таких как:

- малые затраты трудовых и административных ресурсов;
- малое количество требуемых исходных данных;
- возможность прогнозирования на гидрологически неизученных территориях;
- простота и существенное уменьшение заблаговременности прогнозов.

Стоит отметить, что именно данные, полученные путем фонового прогнозирования – отличная основа для более точных, качественных прогнозов стока с большей заблаговременностью, ориентированных, например, на определенный населенный пункт, опасность затопления которого выявлена при фоновом прогнозировании.

Мешают развитию общенациональной системы ФПС прежде всего низкая пространственно-временная дискретность данных, обширные незаселенные территории (как следствие – отсутствие стимула к развитию прогнозирования на них); отсутствие сопутствующей инфраструктуры по обеспечению оперативными данными с необходимой малой дискретностью (час, срок) – техника, центры приема и обработки данных; низкий охват территории радарными наблюдениями; отсутствие технологической цепи, связывающей все звенья в одно целое в масштабе стран; малое число спутников гидрометеорологического назначения, весьма ограниченное сотрудничество с другими странами в силу внешнеполитических факторов.

Главная цель национальной противопаводковой системы (НППС) – снижение экономического и социального ущерба от наводнений, принятие своевременных превентивных мер и эффективных мер по предотвращению развития паводков с высоким затоплением территории.

В Российской Федерации вопрос создания общенациональной системы ФПС находится лишь в стадии обсуждения. Росгидромет в 2003 г. внес

предложения о создании общенациональной автоматизированной системы прогнозирования и предупреждения наводнений сроком исполнения в 2010 – 2015 гг. На данный момент реализации данного проекта в полной мере не завершена, но стоит отметить активную модернизацию сети наблюдений, создание ряда локальных методик, создание специализированных ГИС-систем. Положительная динамика в решении проблемы присутствует, и обусловлена она необходимостью неотложных действий в условиях увеличения числа разрушительных наводнений.

Также разработаны подходы к созданию Информационной системы «Управление паводками на территории России», которая если и не заменит общенациональную систему прогнозирования и предупреждения наводнений, то послужит надлежащей информационной поддержкой при принятии решений по предотвращению и прогнозированию паводков. Информационная система включает в себя три основных блока: АИС «Оперативный дежурный», ГИС «Паводки» и Прогноз опасных гидрологических явлений (принципиальная схема на рисунке 2.4) [28].

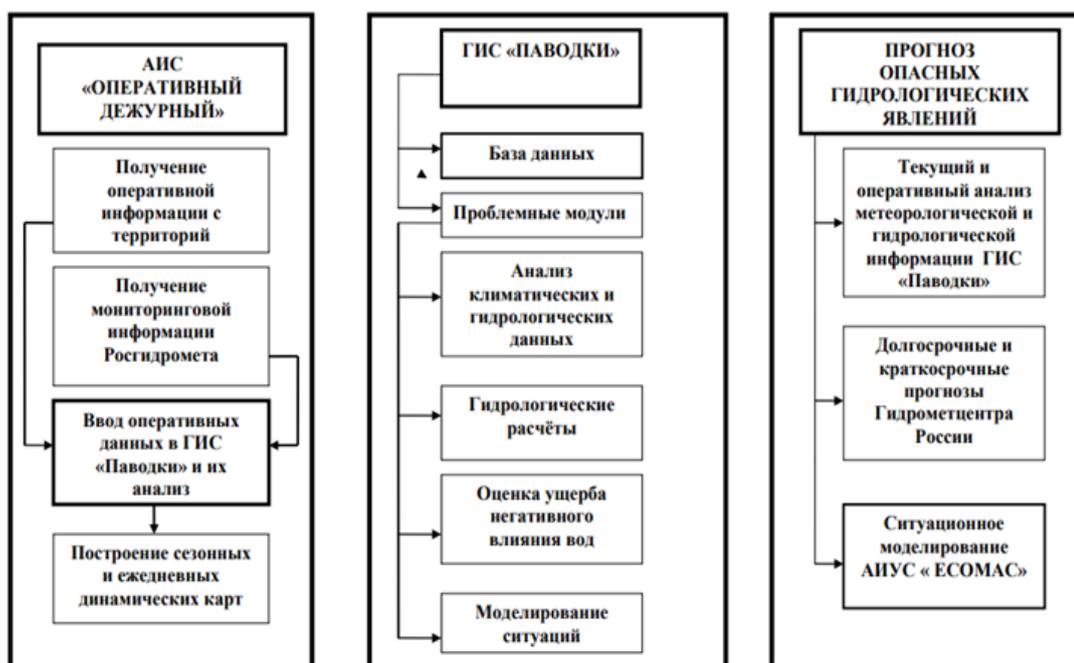


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема системы Управления паводками на территории РФ

Выходным технологическим продуктом данной системы являются динамические карты паводковой опасности. Процесс их получения схематично представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Процесс получения динамических карт паводковой опасности

Разработка данной системы – яркая иллюстрация возможностей в сфере прогнозирования ФПС на территории РФ. Чуть ранее на кафедре геодезии и гидрогеологии РГГМУ также предпринимались попытки создания подобной системы [15]. Принципиальная схема этой системы показана на рисунке 2.6. Процедура выдачи прогноза состоит из пяти последовательных этапов. На 1-м и 2-м из них мероприятия реализуются силами локальных подразделений, либо национальными гидрометеорологическими службами или агентствами. На 3-м этапе данные для контроля и анализа через Интернет загружаются в динамическую базу данных аппаратно-программного комплекса «INWADA» (International Water Data). Четвертый этап – текущая рекалибровка используемой гидрологической модели с последующим прогнозом при помощи модели Sacramento. Далее переход к процедуре принятия решения на основе качественных сценариев

«PREDEFINED DECISION», разработанная в том же РГГМУ под руководством Кузьмина В.А. [28].



Рисунок 2.6 – Блок-схема системы ФПС, разработанной в РГГМУ

Кроме того, после прохождения целого ряда катастрофических паводков, были разработаны локальные системы для Краснодарского края и республики Адыгея, Северного Кавказа [29, 30], Дальневосточного ФО [31] и многих других регионов.

Рассмотрев контент системы ФПС в общих чертах можно перейти к более подробному описанию её структурных блоков.

III. ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ФПС

3.1 Основные виды данных, используемых в системах ФПС

В системах ФПС можно задействовать разнородные данные из различных источников, остановимся на тех, которые в последствии войдут в звенья технологической цепи:

- данные наземных наблюдений;
- данные радарного зондирования;
- данные спутникового зонлирования;
- данные аэрофотосъемок и БПЛА (беспилотных летательных аппаратов);
- выходные данные мезомасштабных моделей погоды (NWP), гидродинамических моделей;
- сопутствующая топографическая основа (векторизованные топографические карты необходимого масштаба, цифровые модели рельефа).

Комплекс всех необходимых данных представлен в Таблице 3.1.

Входные данные должны пройти несколько необходимых процедур:

- 1) полный цикл контроля и анализа качества;
- 2) обработку (включая заполнение пропусков, идентификацию недопустимых символов и документирование внесённых изменений);
- 3) ассимиляцию и архивирование в соответствии с рекомендациями ВМО.

В дальнейшем в главе особое внимание будет уделено данным, доступным на территории России, поскольку при обсуждении проблематики данных невозможно не учитывать физико-географические особенности страны; наличие оперативных, трудовых, административных ресурсов, технической базы и всей сопутствующей инфраструктуры.

Таблица 3.1 Комплекс необходимых входных данных для системы ФПС

Вид данных	Минимальная задержка	Пространственная дискретность	Временная дискретность
Осадки на водосборе с необходимой дискретностью	< 1ч	12,5 км	1 ч
Минимальная и максимальная температура воздуха за сутки	< 1ч	12,5 км	1 ч
Метеоданные с автоматических станций (температура воздуха, скорость и направление ветра, влажность воздуха)	< 1ч	Точечные данные	1ч или 1 мин
Выходные данные гидродинамических моделей (осадки, испарение, интенсивность снеготаяния, температура воздуха, скорость и направление ветра, влажность воздуха)	< 1ч	12,5 км	1 ч
Индекс NDVI	< 24 ч	1км	7 сут
Атмосферное давление на поверхности Земли	< 1ч	12,5 км	1 ч
Температура на поверхности Земли	< 1ч	12,5 км	1 ч
Скорость и направление ветра для каждого пикселя или элементарного водосбора	< 1ч	12,5 км	1 ч
Точка росы	< 1ч	12,5 км	1 ч
Испаряемость	< 1ч	12,5 км	1 ч
Облачность	< 1ч	12,5 км	1 ч
Длинноволновая нисходящая радиация	< 1ч	12,5 км	1 ч
Коротковолновая нисходящая радиация	< 1ч	12,5 км	1 ч
Радарные данные о слое осадков, выпавших на водосбор за последний час	15 мин	1 км	1 ч
Данные о влажности почвы	< 1ч		1 ч

Сеть наблюдений Росгидромета включает в себя следующие ресурсы и способы получения гидрометеорологических данных (рисунок 3.1).

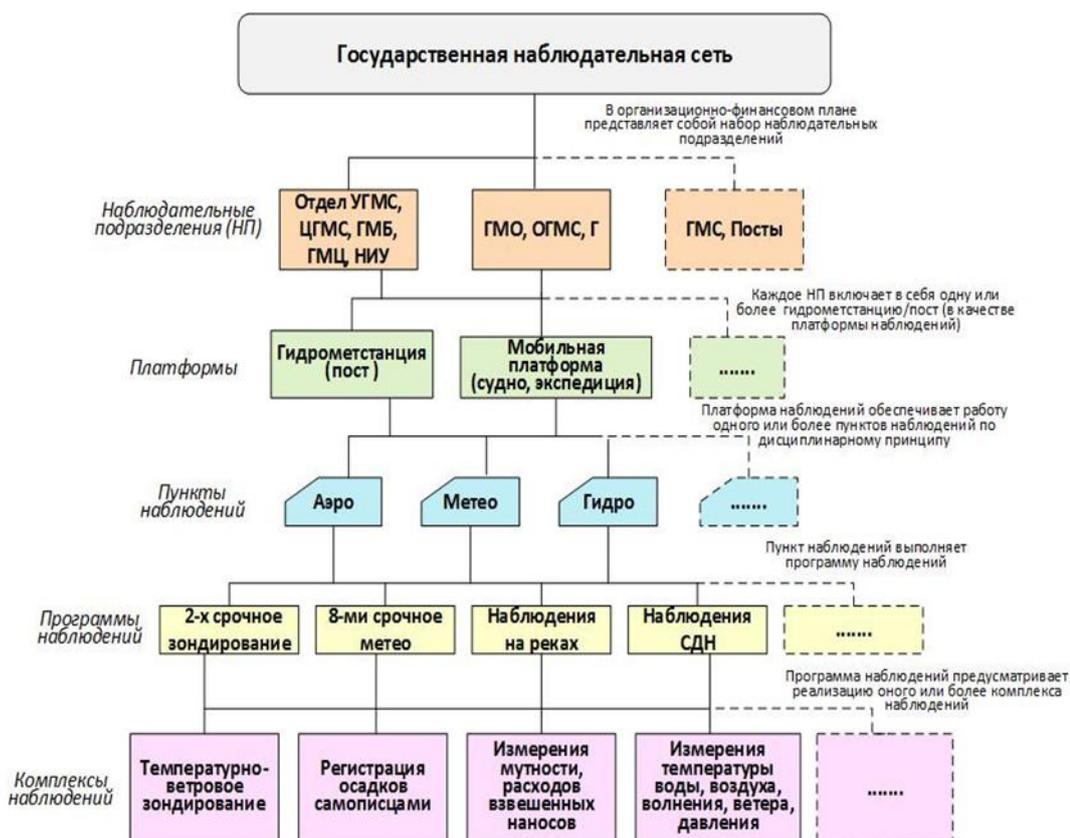


Рисунок 3.1 – Структура сети наблюдений Росгидромета

3.3 Данные наземных наблюдений

Как уже говорилось выше, для РФ свойственна сравнительно низкая пространственно-временная дискретность наземных метеорологических наблюдений. На данный момент согласно данным сайта АИС ГМВО [32] и ГГИ сеть наблюдений Росгидромета насчитывает 2644 гидрологических постов и станции (из них оперативных, ОГП, 340). В рамках проектов «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета» и ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012 – 2020 годах» 708 постов оборудовано автоматическими гидрологическими комплексами (АГК), из которых на начало текущего года работают 578. Итого можно сказать, что только 27% сети гидрологических постов автоматизировано. При этом обеспеченная постами, данные с

которых поступают в режиме реального времени составляет 9440 км², что в 3 раза ниже рекомендованного ВМО уровня и в 70 раз меньше плотности наблюдений в Великобритании, где плотность наблюдений считается достаточной для моделирования ОГЯ. Пространственно-временная дискретность метеоданных выше: по состоянию на декабрь 2016 г. метеорологическая сеть станций Росгидромета насчитывала 1915 пунктов наблюдений, из которых 89 % оборудованы автоматическими метеорологическими комплексами (АМК) [33]. К 2020 г. Росгидромет планирует открытие новых автоматических гидрологических комплексов, около 30 автоматизированных центров сбора информации, 8 аналитических лабораторий и т.д. [34], но это составляет менее 50% от уровня, рекомендованного Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО).

Данные наземных наблюдений используются, как правило, для ассимиляции данных, калибровки и валидации используемых моделей [37].

3.4 Данные радарного зондирования

Радарные данные, прежде всего, повышают пространственно-временную дискретность наблюдений за осадками, что позволяет прогнозировать развитие паводков при помощи концептуальных гидрологических моделей с распределенными параметрами [38].

Россия обладает 33 средствами дистанционного зондирования атмосферы и гидросферы и по их численности уступает США (в среднем в 12 раз), Японии (в 28 раз), Австралии (в 17 раз) и Западной Европе (в 15 раз). На рисунке 3.2 представлены локации всех метеорадаров на карте РФ, и можно сделать вывод о неудовлетворительном покрытии территории, особенно Азиатской части страны и Северных областей [35].

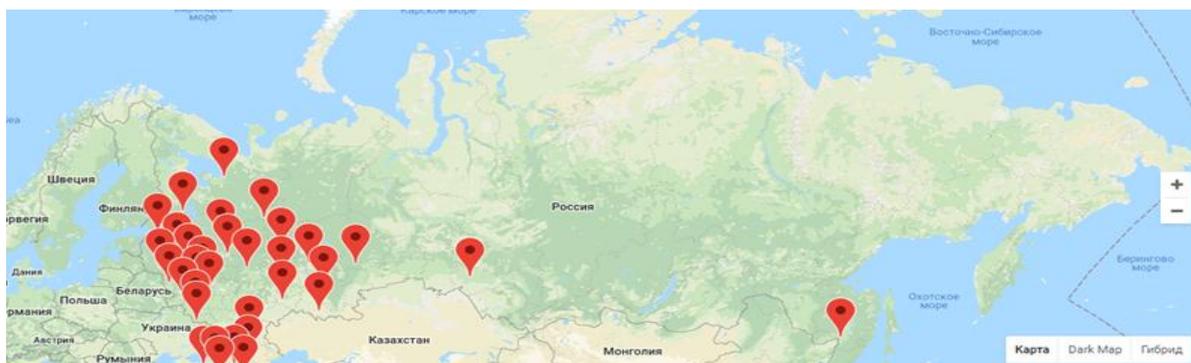


Рисунок 3.2 – Метеорологические радары на территории РФ

При использовании георадарных данных необходимо учитывать ряд особенностей: диапазон зондирования (ДЗ), источники производимых шумов, особенности используемых датчиков (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Особенности применения георадарных данных

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Видимый	Альbedo почвы	Простота, хорошее покрытие	Множество источников шумов	Двумерная функция распределения отражательной способности объектов, облачность, цвет почвы, растительность	AVHRR MODIS Landsat SPOT
Коротковолновый инфракрасный	Влажность почвы и растительности	Очень чувствителен по отношению к влажности почвы	Существенное влияние сигнала, отражающего влажность почвы	Облачность, растительный покров	MODIS ASTER
Тепловой инфракрасный	Температура поверхности	Высокое разрешение, широкая полоса захвата, хорошее покрытие, высокая частота наблюдений, физическая реалистичность	Ширина покрытия и частота наблюдений ограничены облачностью	Метеоусловия	IR-MSS AVHRR MODIS
Активный микроволновый	Коэффициент обратного рассеяния, диэлектрически	Низкий уровень атмосферных шумов,	Ограниченная полоса захвата	Шероховатость и рельеф поверхности Земли,	ERS- Scatterometer

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
	е характеристики	высокое разрешение		растительный покров	
Пассивный микроволновый	Яркость, температура почвы, диэлектрически е характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокая проницаемос ть через слой растительност и	Низкое разрешение, подверженно сть радиопомеха м	Шероховатость поверхности Земли, растительность, температура, средства связи	SMMR AMSR-E SMOS Hydros
Обозначения датчиков	AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer Landsat – программа спутниковых наблюдений, проводимая NASA и USGS SPOT – французская программа спутникового зондирования Земли ASTER – <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> IR-MSS – Infrared Multispectral Scanner ERS-Scatterometer – европейский радар, работающий в С-диапазоне с пространственным разрешением около 50 км SMMR – <i>scanning multichannel microwave radiometer</i> AMSR-E – Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity (европейская программа спутникового зондирования Земли) Hydros – HYDROsphere State mission (программа NASA по спутниковому зондированию Земли)				

3.5 Данные спутникового зондирования

Спутниковые данные могут послужить хорошей базой для прогнозирования развития паводков, и прежде всего – на малоизученных территориях. Для решения этой задачи наибольший интерес представляют данные о влажности верхнего слоя почвы (до 2–5 см от поверхности), позволяющие корректировать начальные условия при моделировании стока, а также различные данные, характеризующие снежный покров – они необходимы при прогнозировании развития весенних половодий снегового генезиса и паводков смешанного генезиса. Перечень гидрологических данных, получаемых с помощью спутникового зондирования, представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Гидрологические данные, получаемы с помощью спутникового зондирования

Гидрологическая характеристика	Вид зондирования	Частота определения	Spatial Resolution
Влажность верхнего слоя почвы (2–5 см)	Пассивное микроволновое	1–3 сут	50 км
	Активное микроволновое	3 сут, 30 сут	3 км, 10 м
	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км
Температура подстилающей поверхности	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км
Протяженность снежного покрова	Видимое / Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	30 –60 м, 500 м –1 км, 4 км
Водный эквивалент снега	Пассивное микроволновое	1–3 сут	50 км
	Активное микроволновое	3 сут, 30 сут	10 м
Изменение запаса воды в водохранилище	Изменение гравитации	30 сут	1 000 км
Полное испарение	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км

Также данные спутников ДЗЗ актуально использовать для решения следующих задач:

- 1) Обновление картографической информации при помощи снимков высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне с космических аппаратов Ресурс-П, GeoEye, WorldView.
- 2) Получение плановых характеристик водосборных площадей, особенностей их рельефа с помощью высокоточных ЦМР.
- 3) Калибровка и верификация гидродинамических моделей. Прежде всего для задания полей шероховатости: по снимкам среднего и высокого разрешения можно выделить и дешифровать области с различными характеристиками подстилающей поверхности (в частности, растительного покрова) и подобрать для каждой из них соответствующий коэффициент из таблиц Срибного, Чоу, Карасева [39].

Российская группировка спутников гидрометеорологического и природо-ресурсного назначения на данный момент исчисляется 8 спутниками: геостационарные спутники Электро-Л №1, Электро-Л №2 и

шесть полярно-орбитальных спутников – Метеор-М №1, Метеор-М №2, Ресурс-П №1, Ресурс-П №2, Ресурс-П №3 и Канопус-В [33]. Этим ресурсам недостаточно, особенно в связи с подписанным в 2006 г. соглашением между NOAA (США) и EUMETSAT (ЕС), которое подразумевает ограничение доступа третьих стран к оперативным данным метеонаблюдений из космоса. Позитивным моментом является разработка космической системы сбора и передачи данных (ССПД), призванной «обеспечивать передачу буквенно-цифровой информации с ПСД сети Росгидромета в центр сбора и обработки данных (г. Москва) в реальном масштабе времени» [36]. Основные составляющие ССПД (на текущий момент):

- ведомственный центр приема информации, расположенный в г. Долгопрудный Московской области (филиал ФГБУ НИЦ «Планета» Росгидромета). Общий вид центра, антенной системы и приемной аппаратуры представлены на рисунке 3.3;
- аппаратура спутниковой связи для оборудования наземной сети ПСД Росгидромета – изделие «Терминал-ГМ»;
- спутники-ретрансляторы Электро-Л и Луч-5А (на первом этапе использовался ретранслятор КА Meteosat по соглашению Росгидромета РФ с EUMETSAT);
- наземный канал передачи данных на базе радиорелейных станций.

Функциональная схема ССПД и ее перспективная версия с обратным каналом связи представлены на рисунке 3.3.

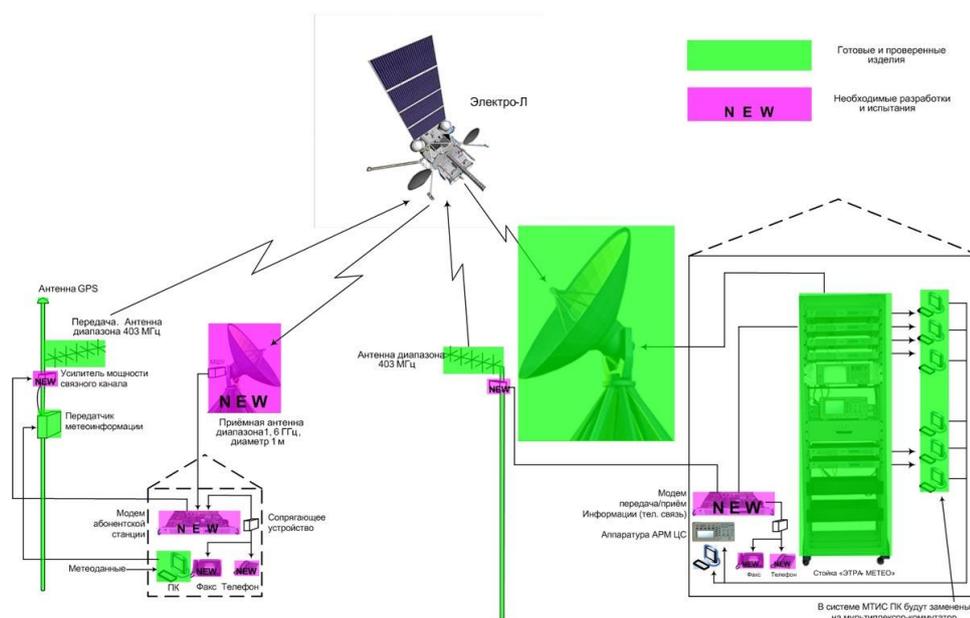
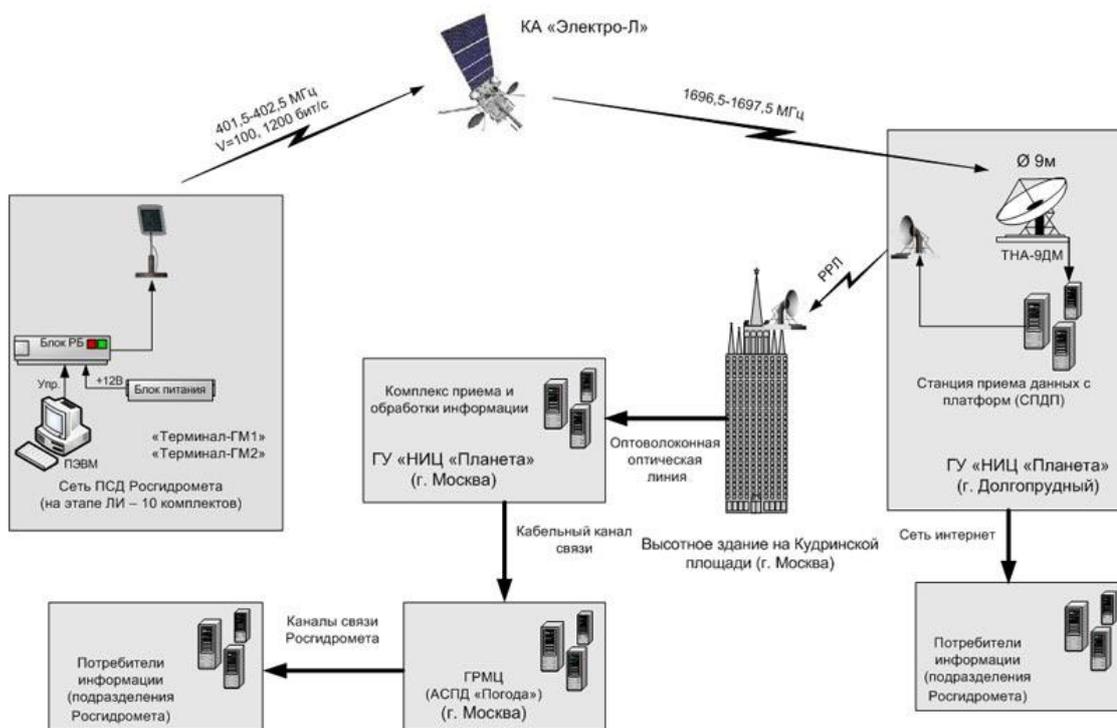


Рисунок 3.3 – Функциональная схема ССПД и ее перспективная версия с обратным каналом связи

3.6 Выходные данные мезомасштабных моделей погоды

Использование данного типа данных позволяет повысить заблаговременность ФП на 3-5 суток. В Гидрометцентре РФ для этих целей адаптирована модель WRF (Weather Research and Forecasting Model), за

рубежом применяются и другие мезомасштабные модели (Таблица 3.4). Помимо использования численного прогноза погоды WRF включает модули параметризации физических процессов в атмосфере, взаимодействий в системе «атмосфера-океан», анализ примесей в атмосфере и другие немаловажные функции.

Таблица 3.4 – Мезомасштабные модели погоды, используемые в разных странах и их характеристики

Страна, название модели	Срок прогноза (часы)	Шаг сетки по горизонтали (км)	Количество уровней по вертикали	Источник информации на боковых границах	Система усвоения данных
Канада (Geg-GEM)	48	15	58	GEM	4DVAR
Китай (GRAPES_Meso)	—	30	33	GRAPES	—
США (WRF-NMM, WRF-ARW)	84	12	60	GFS	3DVAR (GSI)
Япония (NHM)	33	5	50	RSM	Meso 4DVAR

В ЕС на данный момент существует несколько подходов к использованию и усовершенствованию оперативных систем мезомасштабного прогноза погоды:

- 1) ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) – основой являются разработки метеослужбы Франции; внутри группы ALADIN страны центральной Европы (Австрия, Венгрия, Румыния, Словакия, Словения, Чешская республика, Хорватия) создали подгруппу LACE (Limited Area modelling in Central Europe) с региональным центром в Праге;
- 2) COSMO (Consortium for Small-scale Modelling) – основой являются разработки метеослужбы Германии (с 2007 сюда входит и Россия);

3) HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) – основой являются совместные разработки метеослужб скандинавских стран и Испании, при этом с самого начала создания этой группы Франция принимает участие на уровне научных разработок.

Стоит отметить, что объемы информации, передаваемой такими моделями, чрезвычайно велики. Раньше обмен данными между различными научно-исследовательскими структурами и ведомствами осуществлялся через сеть Интернет, что накладывало значительные ограничения по скорости и качеству передаваемой информации. Во избежание подобных проблем в начале 200-х годов была разработана технология ГЛОРИАД (GLORIAD – Global Ring Network for Advanced Application Development) – глобальная высокоскоростная сетевая инфраструктура, предназначенная для телекоммуникационного обеспечения передовых научных проектов. ГЛОРИАД поддерживается консорциумом, в который входят 11 стран: США, Российская Федерация, Китайская Народная Республика, Корея, Нидерланды, Канада и страны Северной Европы (Дания, Швеция, Норвегия, Финляндия и Исландия), цель которых – построение глобальной оптической сети кольцевой топологии с пропускной способностью 10 Гбит/с. Со стороны России координатором проекта является Российский научный центр «Курчатовский институт» [40].

IV. МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ФПС

Выбор подходящей гидрологической модели – важнейшая задача, решение которой необходимо для функционирования системы ФПС на должном уровне. Прежде всего, необходимо выбрать тип модели (диаграмма на рисунке 4.1).

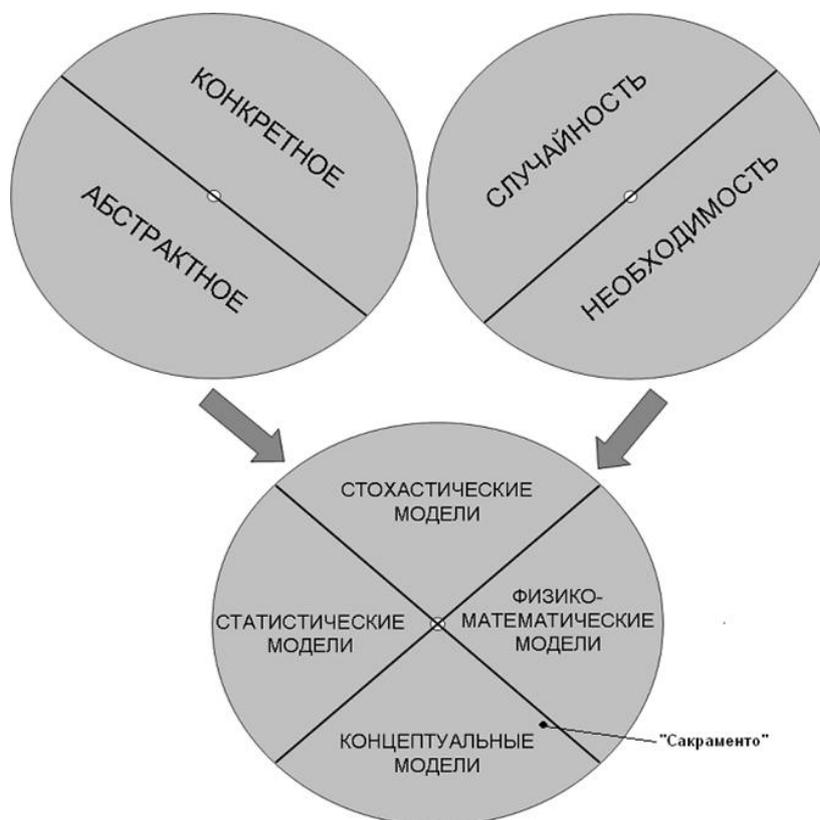


Рисунок 4.1 — Диаграмма типов моделей с разных точек зрения

Области применимости каждого типа моделей уникальны. Так, например, физико-математические модели подходят для моделирования простых процессов, полностью подкрепленных имеющимися данными наблюдений. Стохастические (динамико-стохастические) модели применимы тогда, когда происходящие на водосборе процессы в целом понятны, но имеющиеся данные не могут описать некоторые из них. Концептуальные модели могут использоваться тогда, когда полного понимания происходящих процессов нет, и их нужно описать абстрактно.

Итак, для должного функционирования системы ФПС искомая модель, которая могла бы стать ее функциональным ядром, должна соответствовать следующим требованиям:

- «входом» модели должны быть данные стандартных гидрометеорологических наблюдений;
- модель должна допускать возможность реализации и с сосредоточенными, и с распределенными параметрами;
- модель должна адекватно описывать трансформацию паводочной волны по склонам водосбора и по русловой сети (поэтому она не может быть статистической);
- модель не должна иметь чрезмерно большого числа параметров (это необходимо для осуществления возможности автоматической калибровки ее модификация с распределенными параметрами);
- временной шаг модели должен быть достаточным для описания паводочного стока;
- желательно, чтобы модель позволяла выполнять расчет влажности верхнего слоя почвы (в этом случае ее можно «подстраивать» при помощи спутниковых данных о содержании воды в верхнем слое почвы толщиной 2-5 см).

Данные требования сразу «отсеяли» десятки неподходящих моделей. В частности, из дальнейшего рассмотрения сразу же были исключены:

- все статистические модели и прогностические методы, основанные на построении статистических связей в графической или аналитической форме;
- все физико-динамические модели, для использования которых необходимы нестандартные исходные данные (например, разработанная Виноградовым Ю.Б. модель «Гидрограф» (ГТИ-90) [42]);
- все локальные физико-динамические модели, описывающие лишь местную комбинацию стокообразующих процессов и факторов (например, модель Гарцмана [43]);
- все стохастические модели, подразумевающие сложную процедуру идентификации стохастических параметров (например, стохастические

обобщения физико-математических уравнений на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова [44]);

- все модели, не доведенные до стадии оперативного внедрения и не имеющие доступного программного обеспечения.

Таким образом, в список моделей для детального анализа и окончательного отбора попали следующие модели [45]:

- 1) Модель «VIC» (the Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic model) (США), позволяющая учитывать и водный, и энергетический баланс.
- 2) Австралийская воднобалансовая модель «AWBM» (the Australian Water Balance Model).
- 3) Модель «SIMHYD» (от англ. «SIMplified HYDrograph» – упрощенный гидрограф).
- 4) Модель PDM (probability distribution model).
- 5) Модель «SMAR» (Soil Moisture Accounting Runoff model).
- 6) Модель MLCM3 (Multi-Layer Conceptual Model).

Характеристики и свойства всех приведенных выше моделей представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Свойства и характеристики рассматриваемых моделей

Модель	E2-инструментарий	Энергетический баланс	Водный баланс	Сосредоточенными параметрами	Сраспределенными параметрами	Трансформация паводочной волны	Калибровка	Число параметров	Землепользование	Временной шаг
Sacramento	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	11	<input checked="" type="checkbox"/>	1,6,24				
AWBM	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	8	<input checked="" type="checkbox"/>	24				
SIMHYD	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				7	<input checked="" type="checkbox"/>	24
SMAR	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				9		24
VIC		<input checked="" type="checkbox"/>		36	<input checked="" type="checkbox"/>	1,24				
PDM			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	13		1,24
MLCM-3			<input checked="" type="checkbox"/>	2n+5*		1,24				

Таблица 4.2 – Моделируемые переменные рассматриваемых моделей

Модель	Влажность верхнего почвенного слоя	Температура поверхности земли	Грунтовые воды	Поверхностный сток	Содержание воды в снеге
Sacramento	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AWBM	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
SIMHYD	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
SMAR	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
VIC	<input checked="" type="checkbox"/>				
PDM	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
MLCM-3	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

* n – количество используемых при моделировании слоев;

** – только при помощи блока для расчета водоотдачи из снега «SNOW-17».

В результате анализа всех моделей установлено, что модель «VIC» (равно как и «ГГИ-90») не может применяться в оперативном режиме, поскольку не все требуемые исходные данные могут быть получены в результате стандартных гидрометеорологических наблюдений.

Модель PDM может быть использована только для констатации факта паводка.

Модели «AWBM», «SIMHYD» и «SMAR» фактически являются упрощенными версиями более детальной модели «Sacramento».

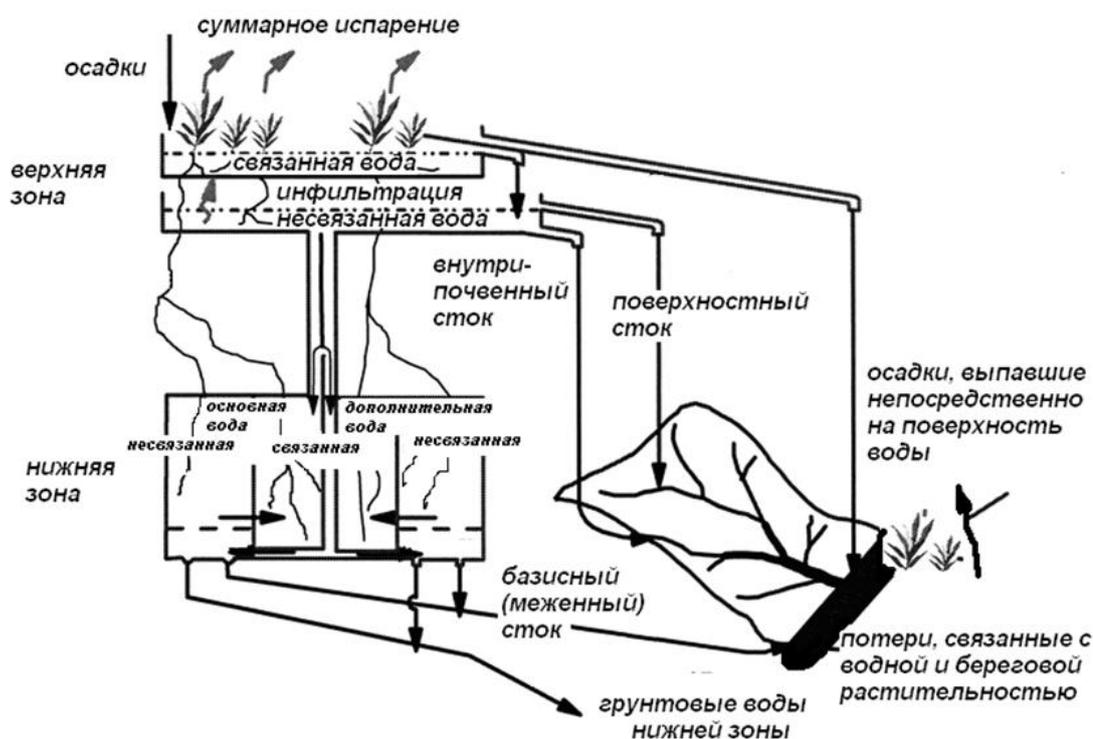
Сама же модель «Sacramento» наиболее эффективна тогда, когда процессы снеготаяния не оказывают существенного влияния на формирование паводков. В противном случае ее необходимо использовать вместе с дополнительным блоком для расчета водоотдачи из снега «SNOW-17». Применение этой модели сопряжено с потреблением чрезмерно большого объема вычислительных и временных ресурсов на стадии калибровки модели, для которой, ко всему прочему, не всегда хватает необходимых гидрогеологических данных. Поэтому использование модели «Sacramento» в качестве основной прогностической модели на территории России не может быть повсеместным, что не удовлетворяет требованиям проводимого исследования.

Оптимальным видится выбор модели MLCM-3. Структурно она гораздо проще «Sacramento», при этом обладает большой гибкостью, концептуальностью, не требует высокого уровня обеспеченности исходными данными. Результаты экспериментального численного моделирования оказались сопоставимы с результатами, получаемыми с помощью модели «Sacramento», что лишней раз подтверждает эффективность её внедрения в систему ФПС. Ведь именно относительно низкая информационная обеспеченность, простота и отсутствие излишних задержек при прохождении звеньев технологической цепи позволяют снизить заблаговременность ФП, тем самым выигрывается драгоценное время для принятия управленческих решений. Наиболее эффективна данная модель при прогнозировании

развития дождевых паводков. Если же паводок обусловлен таянием снега на водосборной площади в сочетании с выпадением осадков, можно рассмотреть внедрение модели, разработанной в начале 80-х годов в Гидрометцентре СССР Корнем В.И. и Бельчиковым В.А. (известной также как модель Гидрометцентра [46]) или динамико-стохастические методы Кучмента Л.С., Гельфана А.Н. [47].

Еще одним относительным минусом MLCM-3 является отсутствие аппарата моделирования уровней грунтовых вод (что в пределах нашей страны не актуально из-за отсутствия надежных входных данных даже в отдаленной перспективе) Перспективными в данном направлении можно назвать зарубежные модели Soil and Water Assessment Tool (SWAT) и Water Assessment Tool-Variable Source Area (SWAT-VSA) [40].

Концептуальные схемы моделей «Sacramento» и MLCM-3 представлены на рисунке 4.2.



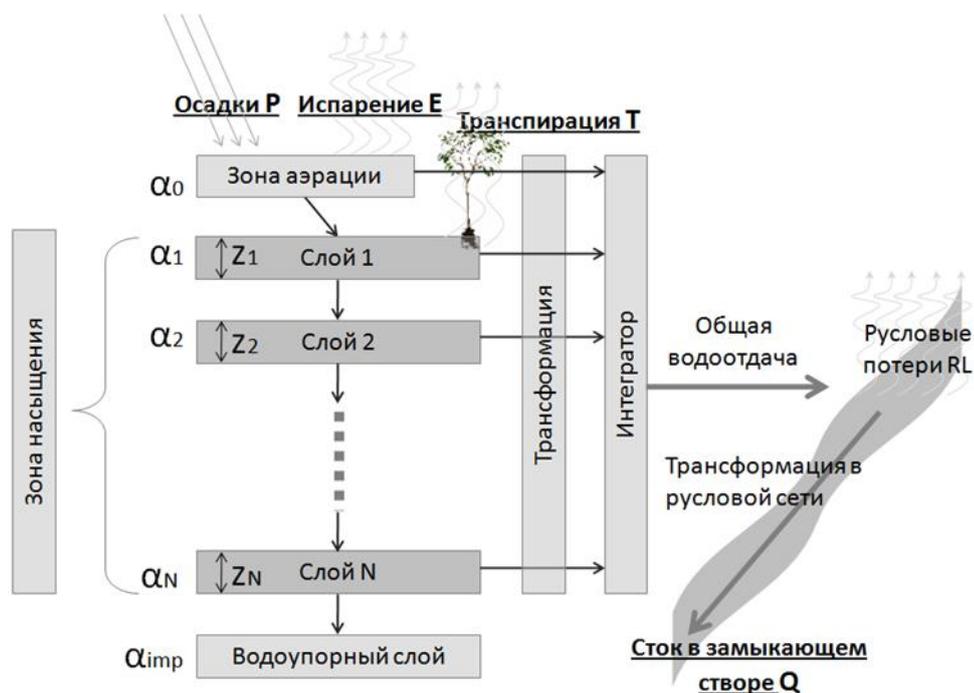


Рисунок 4.2 – Концептуальные схемы моделей Sacramento и MLCM-3

Модель MLCM позволяет рассчитать суммарную водоотдачу с единичной ячейки или целого водосбора (для которого должна быть известна площадь, длина основного русла и средняя длина обоих склонов). В модели учитываются основные гидрометеорологические факторы, определяющие формирование стока:

- Жидкие осадки, попадающие на поверхность водосбора и проникающие в почву. Если на формирование паводков существенное влияние оказывают процессы снеготаяния, то задается эквивалентное значение воды, которое можно рассчитать, например, при помощи блока для расчета водоотдачи из снега («SNOW-17»). При фоновом прогнозировании дождевых паводков слой осадков может быть задан по выходным данным модели WRF, а при уточнённом – по радарным данным и данным наблюдений на локальной сети автоматических метеостанций.
- Поверхностное задержание воды в микро- и мезо- депрессиях и непосредственное стекание воды по поверхности водосбора (учитываются при оптимизации скорости поверхностного стекания α_0);
- Потери воды на испарение и транспирацию, включая прямое испарение с поверхности водотока и потребление воды водной и прибрежной

растительностью (в настоящее время задаются по выходным данным модели WRF, и, кроме того, могут быть рассчитаны по данным спутниковых наблюдений и с помощью методики FAO);

– Инфильтрации воды и ее просачивание в русло по N слоям почвогрунтов мощности Z_i (скорость инфильтрации α_i принимается постоянной для каждого слоя; скорость вертикальной инфильтрации принимается равной модулю скорости инфильтрации), просачивание в каждом слое описывается уравнением Дарси;

– Трансформацию паводочной волны в русловой сети (описываемую уравнением кинематической волны или при помощи расчётной схемы Маскингам-Кюндж).

Из схемы на рисунке 4.2 видна причина гибкости модели MLCM-3: она позволяет смоделировать распространения воды не в двух постоянных зонах (верхней и нижней) и 5 емкостях, а в N слоях. Причём значение N принципиально может быть каким угодно (целое, $N \geq 0$), оно подбирается методами оптимизации вместе с другими параметрами или задается пользователем. Как показал первый опыт моделирования стока, главным лимитирующим фактором числа слоев N является время, которое предполагается затратить на калибровку модели, поскольку для каждого слоя должно быть задано два параметра (мощность слоя Z_i и скорость инфильтрации α_i). Учитывая необходимость расчёта ординат единичного гидрографа, который в настоящее время аппроксимируется при помощи двухпараметрического гамма-распределения (с параметрами h и T), общее число параметров модели N_p равно $2N + 5$.

Автоматическая калибровка модели MLCM в настоящее время производится по специально разработанному алгоритму, описанному в [48].

Все параметры модели представлены в Таблице 4.3.

Таблица 4.1 – Параметры модели MLCM3

№	Название	Обозначение	Наименьшее	Наибольшее	Размерность
1	Число слоёв	N	0	10	шт.
2	Скорость поверхностного стекания при насыщенной почве	a_0	0	10^6	мм/час
3	Скорость трансформации паводочной волны (метод Маскингам-Кюндж)	C	0	10	б/р
4	Максимально возможное число ординат единичного гидрографа (принимается постоянным)	n(uh)	12	300	шт.
5	Параметр №1 гамма-распределения (форма)	$k(uh)$	1	20	б/р, целое, >0
6	Параметр №2 гамма-распределения (масштаб)	$\theta(uh)$	1	5	б/р, >0
7	Параметр сдвига единичного гидрографа	t(uh)	0	24	час
8	Скорость инфильтрации 1-ого слоя	a_1	0	10^6	мм/час
9	Мощность 1-ого слоя	Z_1	0	10^5	мм
10	Скорость инфильтрации 2-ого слоя	a_2	0	10^6	мм/час
11	Мощность 2-ого слоя	Z_2	0	10^5	мм
12	Скорость инфильтрации 3-его слоя	a_3	0	10^6	мм/час
13	Мощность 3-его слоя	Z_3	0	10^5	мм
14	Скорость инфильтрации 4-ого слоя	a_4	0	10^6	мм/час
15	Мощность 4-ого слоя	Z_4	0	10^5	мм
16	Скорость инфильтрации	a_5	0	10^6	мм/час

	5-ого слоя				
17	Мощность 5-ого слоя	Z_5	0	10^5	мм
18	Скорость инфильтрации 6-ого слоя	a_1	0	10^6	мм/час
19	Мощность 6-ого слоя	Z_6	0	10^5	мм
20	Скорость инфильтрации 7-ого слоя	a_7	0	10^6	мм/час
21	Мощность 7-ого слоя	Z_7	0	10^5	мм
22	Скорость инфильтрации 8-ого слоя	a_8	0	10^6	мм/час
23	Мощность 8-ого слоя	Z_8	0	10^5	мм
24	Скорость инфильтрации 9-ого слоя	a_9	0	10^6	мм/час
25	Мощность 9-ого слоя	Z_9	0	10^5	мм
26	Скорость инфильтрации 10-ого слоя	a_{10}	0	10^6	мм/час
27	Мощность 10-ого слоя	Z_{10}	0	10^5	мм

V. РАСЧЕТ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ МАЛОЙ ДИСКРЕТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ Р. МЗЫМТА ДЛЯ НУЖД ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MLCM3

Для наглядной демонстрации возможностей системы ФПС на основе модели MLCM-3 для нашей страны необходим массив входных данных, обеспечивающий нужды данной программы (таблица 5.1)

Таблица 5.1 – необходимые входные данные для MLCM3

№	Название	Обозначение	Размерность	Примечание
1	Осадки	P	мм	Обязательная переменная
2	Полное испарение (эвапотранспирация)	ET	мм	Может быть определено методом интерполяции по среднемесячным данным
3	Расход воды в замыкающем створе	Qobs	м ³ /сек	Используется для калибровки и валидации
4	Русловые потери	RL	мм	Опционально
5	Поверхностное задержание	SL	мм	Опционально

С данными по осадкам и расходам воды дискретностью час после процессов модернизации гидрологического поста на р. Мзымта – п. Красная Поляна (описание поста представлено в таблице 5.2) проблем не возникает. Ежечасные данные суммы выпавших осадков поступают напрямую с ОК, расходы воды – с АГК. С источниками данных по испарению традиционно возникают затруднения. Нормативно непосредственные измерения испарения с поверхности почвы проводятся лишь два раз в пять суток, расчетные методики с должной точностью производят вычисления лишь месячных или годовых сумм испарения, а даже самые современные приборы для его измерения имеют дискретность измерений 2 раза в день [16]. Более того, для модели MLCM3, как производной от Sacramento, наиболее подходящими будут входящие данные не по испарению, а по эвапотранспирации.

Расчет данного параметра производился по уравнению Пенмана-Монтейта, рекомендованному Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) и ВМО [13]:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (5.1)$$

где	ET_0	–	эталонная эвапотранспирация [мм*сут ⁻¹];
	R_n	–	чистая радиация на поверхности растений [МДжм ⁻² сут ⁻¹]
	G	–	плотность теплового потока почвы [МДж м ⁻² сут ⁻¹];
	T	–	средняя за рассматриваемый период температура воздуха на высоте 2 м [°C];
	u_2	–	средняя за рассматриваемый период скорость ветра на высоте 2 м [м с ⁻¹];
	e_s	–	давление пара насыщения [кПа]
	e_a	–	фактическое давление [кПа]
	$(e_s - e_a)$	–	дефицит давления пара насыщения [кПа]
	Δ	–	уклон кривой давления пара [кПа °C ⁻¹]
	γ	–	психрометрическая постоянная [кПа °C ⁻¹]

Процесс расчета по данному уравнения был автоматизирован с помощью приложения ET_0 Calculator, разработанного специалистами ФАО [49]. Процесс расчета начинается с ввода данных о географическом положении объекта исследования, которые в последствии могут использоваться при отсутствии данных о солнечной радиации (рисунок 5.1).

Далее в текстовом файле формата .СХТ подготавливается массив данных и импортируется в специальный модуль, интерфейс которого предлагает определить местоположение столбцов с теми или иными данными в импортируемом файле (рисунок 5.2), автоматически задает для каждого из

них пределы (что уменьшает риск случайной ошибки), дискретность данных, а также задаться временным промежутком для рассматриваемого ряда.

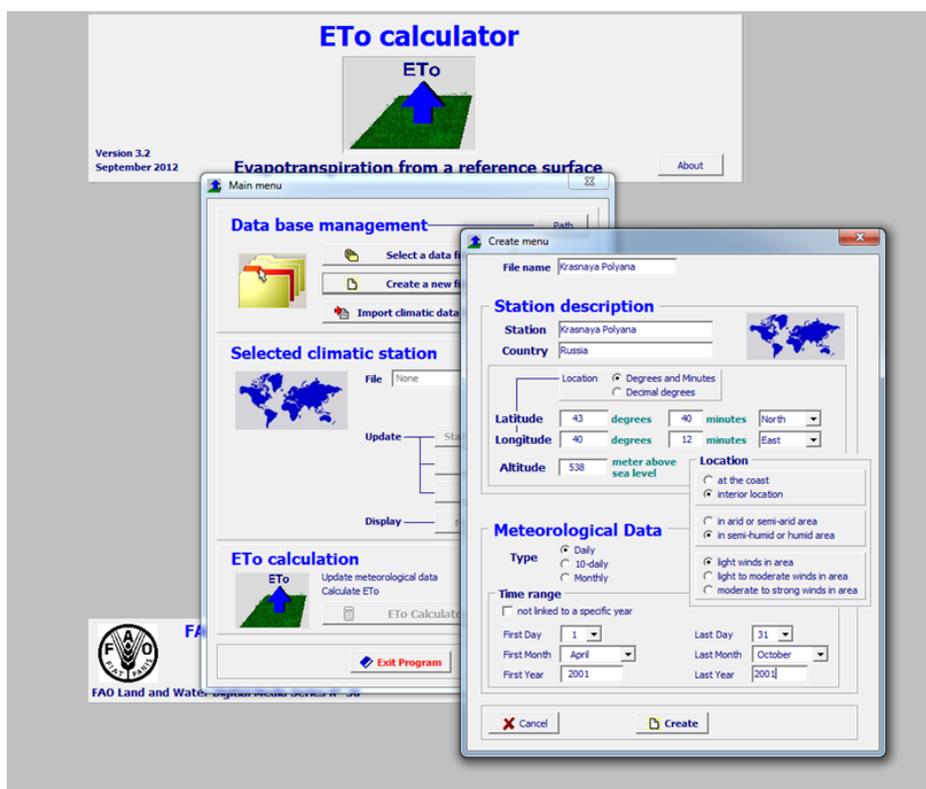


Рисунок 5.1 – Ввод данных о географическом положении станции

В конце заполнения всех блоков (все индикаторы зеленые, рисунок 5.2) мета-файл готов к импортированию в следующий модуль. В данном случае все данные были получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных ГУ ВНИИГМИ-МЦД с дискретностью сроков наблюдений [50]. Для более точного расчета можно использовать данные радарных наблюдений за солнечной радиацией мировой наземной сети, которые доступны на сайте [51].

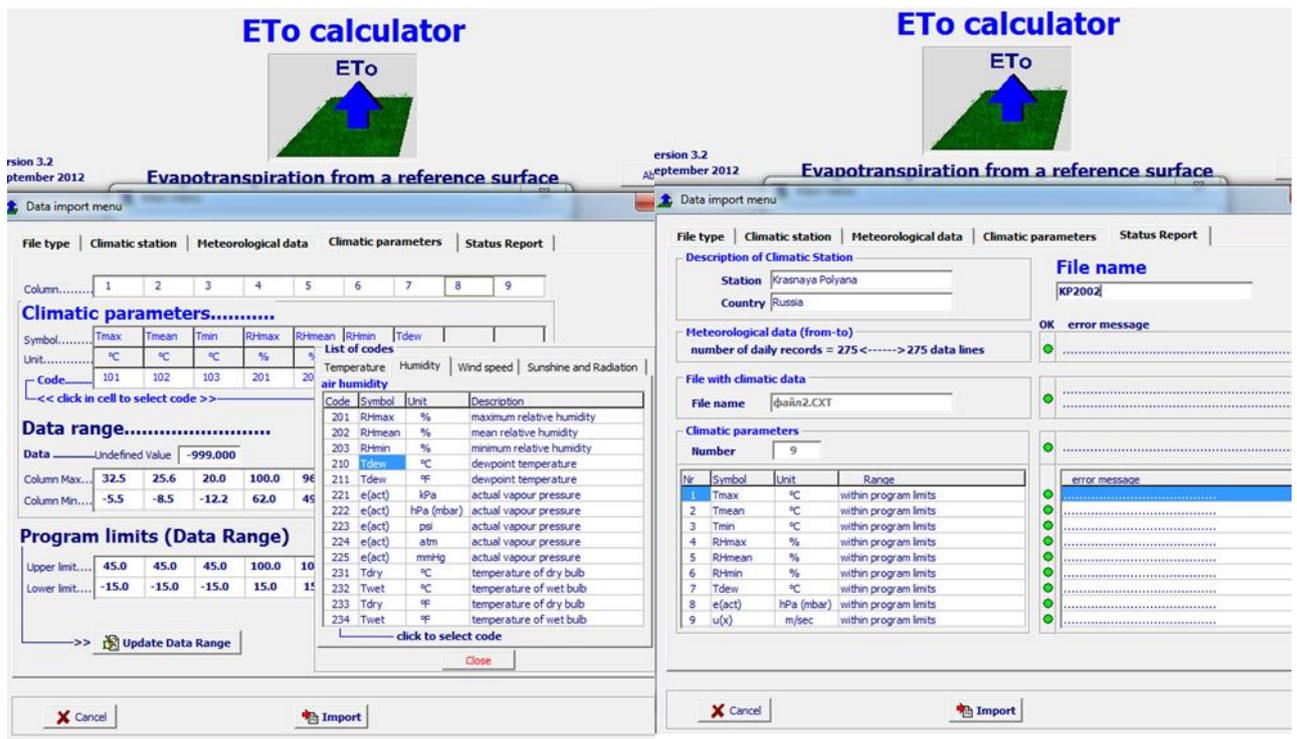


Рисунок 5.2 – Модуль импортирования данных

Модуль расчета значений эталонной эвапотранспирации выполняет все расчеты в автоматическом режиме с дискретностью день, месяц, год с возможностью дальнейшего экспортирования информации в специализированные отчеты или же обычные текстовые файлы. Есть возможность реализовать расчетные операции с любой необходимой дискретностью, которая обеспечена надежными метеорологическими данными. Наглядный пример интерфейса представлен на рисунке 5.3.

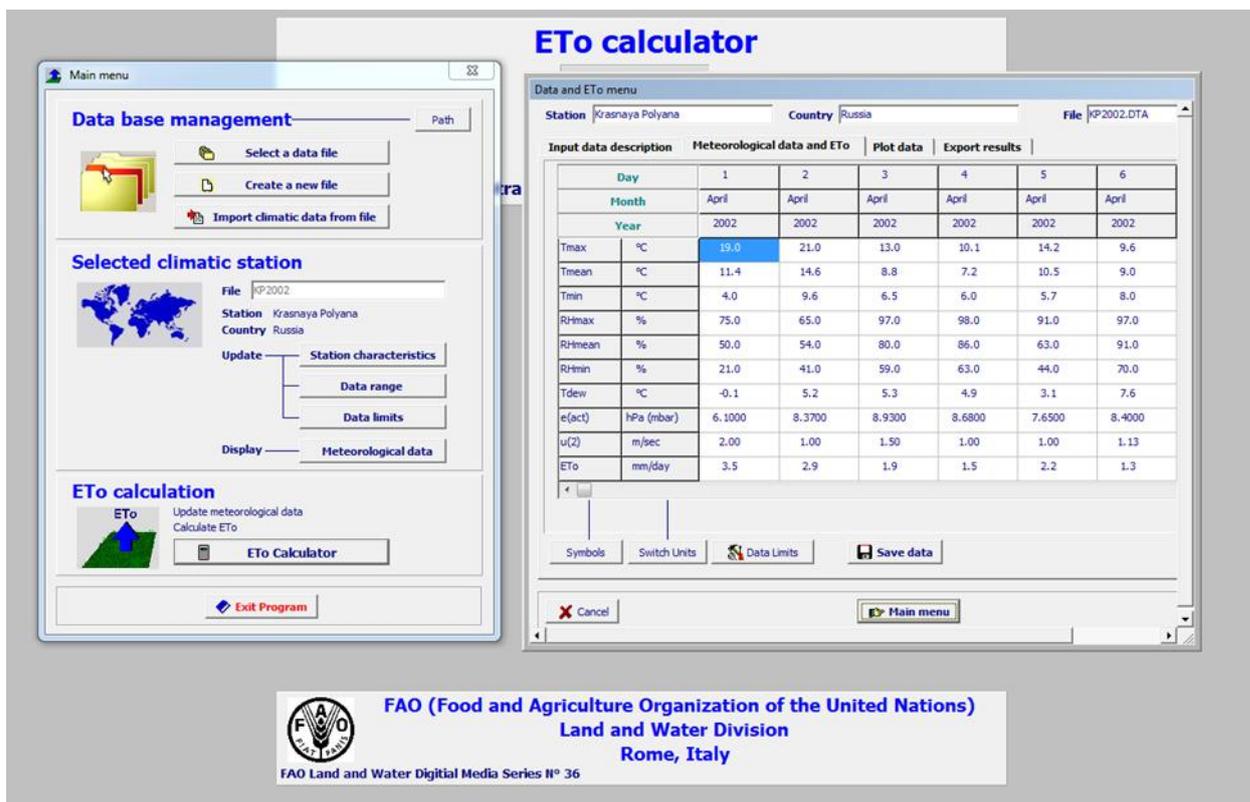
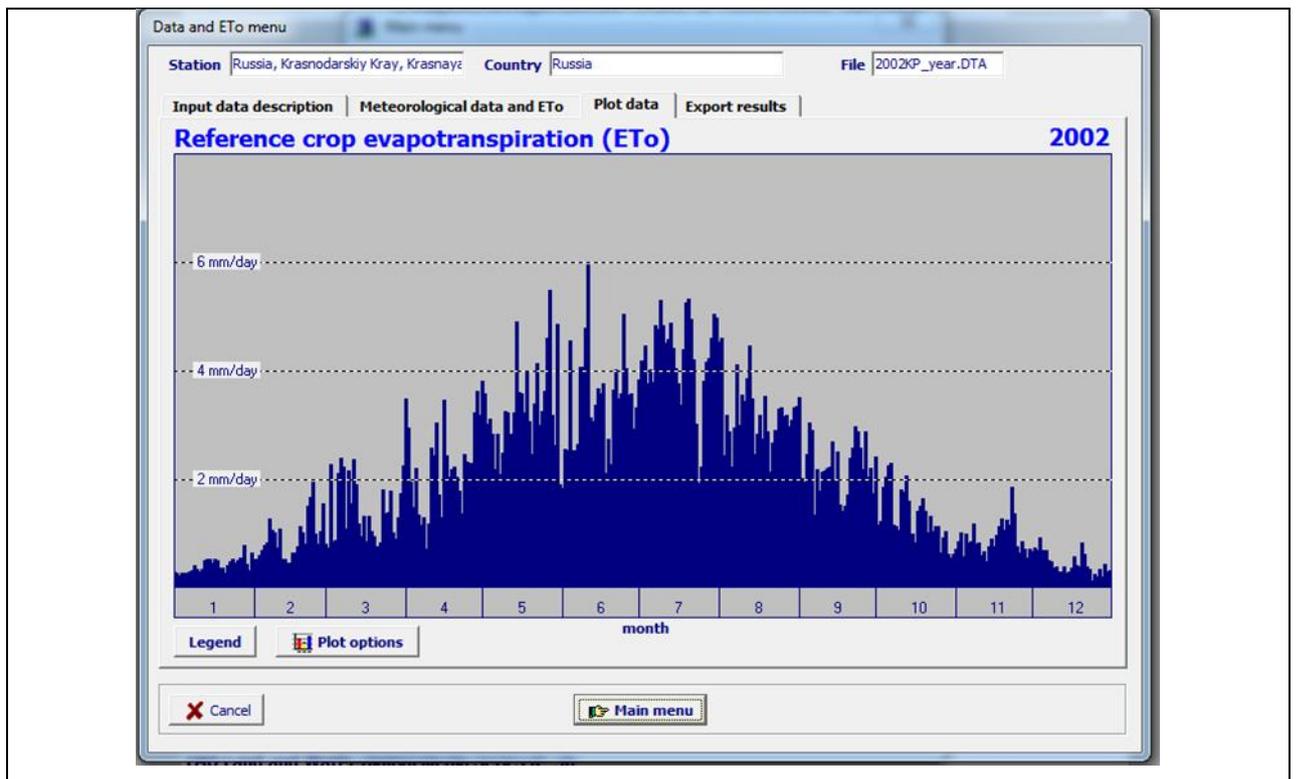


Рисунок 5.3 – Модуль расчета ежедневных значений эталонной
эвапотранспирации

В результате расчетов получены ежедневные значения эвапотранспирации (график хода значений эвапотранспирации за год и образец итогового протокола из калькулятора эвапотранспирации представлены на рисунке 5.4) Исходные данные и результаты расчетов ежедневной транспирации представлены в Приложении А.



```

EditPad Lite 7 - [C:\Users\UVM\Downloads\EToCalculator64Bit\REPORT\2002KP_year.ETo]
File Edit Search Go Block Extra Convert Options View Help
2002KP_year.ETo
Russia, Krasnodarskiy Krai, Krasnaya Polyana (Russia) - daily data: 1 January 2002 - 31 December 2002
1 : Daily records (1=daily, 2=10-daily and 3=monthly data)
1 : First day of record (1, 11 or 21 for 10-day or 1 for months)
1 : First month of record
2002 : First year of record (1901 if not linked to a specific year)

Average ETo (mm/day)
-----
0.3
0.3
0.2
0.3
0.3
0.3
0.3
0.3
0.4
0.3
0.3
0.3
0.5
0.5
0.5
0.4
0.5
0.5
0.5
0.4
0.3
0.3
0.4
0.5
0.5
0.5
0.4
0.5
0.5
0.5
0.8
0.8
1.3
1.0
1.0
0.7
1.1
0.5
0.5
0.4
0.2

```

Рисунок 5.4 – График хода значений эвапотранспирации за год и образец итогового протокола из калькулятора эвапотранспирации

Для оценки надежности полученных результатов была рассчитана годовая сумма испарения по формуле, аппроксимирующей диаграмму Константинова:

$$E_{\text{срг}} = 73,17e + 4,47T + 5,05e^2 - 0,36T^2 - 0,205e^3 - 0,00317T^3 + 0,0036e^4 + 0,000401T^4 - 3,087eT - 265,49 \quad (5.1)$$

где	$E_{\text{срг}}$	–	Среднегодовая сумма испарения [мм]
	e	–	Среднегодовое значение упругости водяного пара [мБар]
	T	–	Среднегодовое значение температуры воздуха [°C];

Для 2002 года по данным со станции Красная Поляна среднегодовая температура составила 10,6°C, среднегодовая упругость водяного пара 11мБар, испарение по формуле Константинова 579 мм. Сумма эвапотранспирации по формуле Пенман-Монтейта 729 мм. Переход к сумме испарения происходит с помощью коэффициента K_p , который зависит от средней скорости ветра (менее 1м/с) и среднегодовой влажности воздуха (более 70%), для данных условий $K_p=0,75$ [49]. Итого суммарное испарение методом FAO оценивается в 547 мм. Погрешность относительно метода Константинова составила всего 5,5%.

Но доступная дискретность расходов и осадков отличается, данные по этим характеристикам ежечасные. Интерполировать ежедневное испарение равнозначно для каждого часа некорректно. В калькуляторе не предусмотрена возможность расчета эвапотранспирации с дискретностью 3 часа (стандартный срок метеонаблюдений) или 1 час, но возможно получить оценку распределения эвапотранспирации внутри дня по срочным данным, что и было сделано. Интерполировать данную характеристику через каждые 3 часа возможно, физически за столь короткий промежуток серьезных изменений происходить не должно. Так были получены весовые коэффициенты, с помощью которых можно перейти от ежедневных значений

эвапотранспирации к ежечасным. Далее были отобраны данные по одному из паводков – с 19 по 27 июля 2002 года на р. Мзымта – п. Красная Поляна (рисунок 5.5). Описание поста представлено в таблице 5.2.

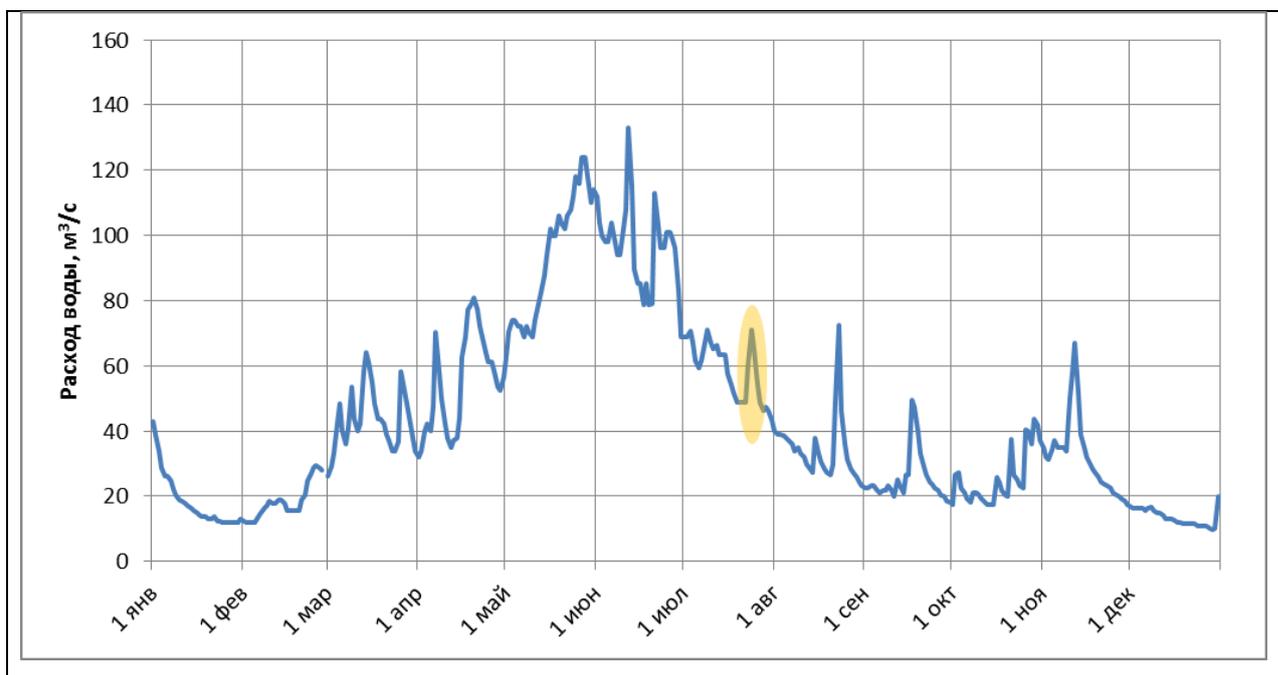


Рисунок 5.5 – Гидрограф р. Мзымта – п. Красная Поляна за 2002 год с выделением паводка для расчета ежечасной эвапотранспирации

Таблица 5.2 Описание поста

Станция	Код поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбор, км ²	Высота, мБС
р. Мзымта – п. Красная Поляна	82050	41	510	465,73

Результаты расчета ежечасной эвапотранспирации представлены в Приложении Б. По результатам расчетов был построен график хода слоев стока, осадков и эвапотранспирации за период паводка (Приложение В).

Далее для прогнозирования развития паводка расчет ведется в программе «Multi-Layer Conceptual Model, version 3» (MLCM-3) [52]. Для расчёта параметров требуется указать данные о водосборе (его площадь), дискретность данных и максимальное число ординат гидрографа. Загрузить

данные по испарению, осадкам и стоку. Настроить параметры модели относительно вида целевой функции.

На данный момент программный комплекс еще не запущен и тестируется на зарубежных данных – продолжительная, скрупулезная процедура, поэтому до полноценной реализации задуманного в данной работе рассчитывать не приходится. Можно лишь представить визуальные результаты производимых экспериментов на реках Непала (рисунок 5.6).

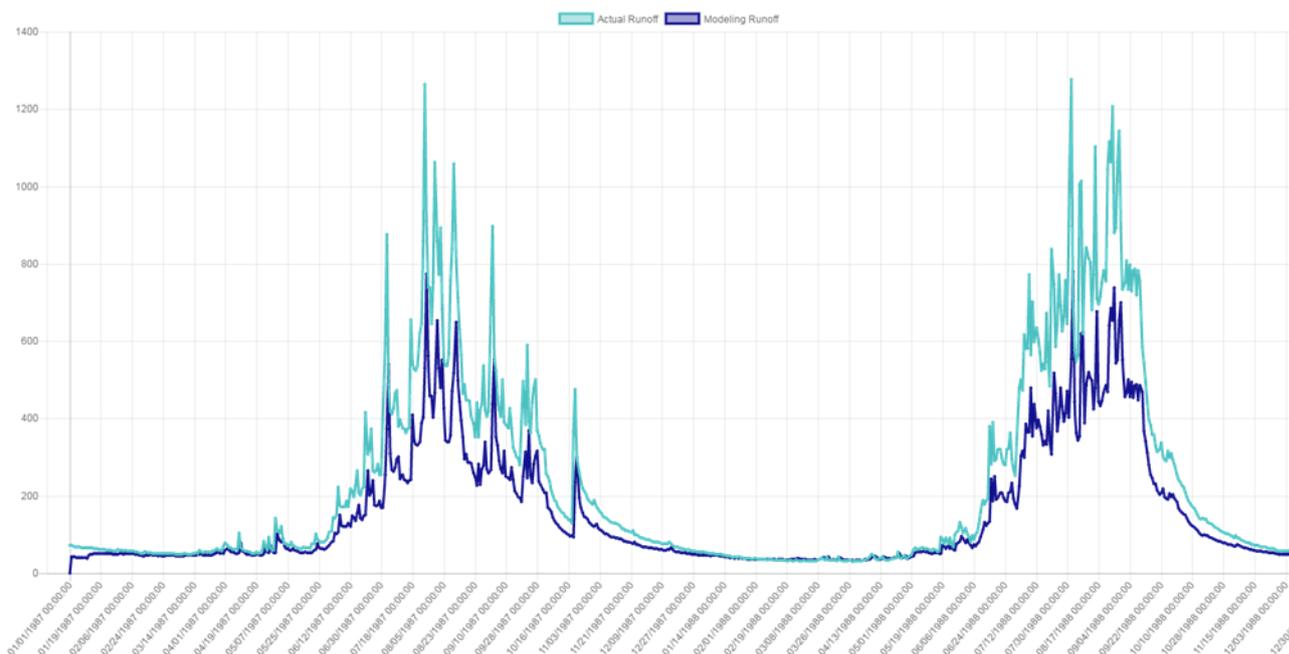


Рисунок 5.6 – Прогностический и фактический гидрографы стока на р. Дудх-Коси, округ Коси (Непал), с 01.01.1987 по 31.12.1988

Резюмируя, можно отметить, что сама перспектива создавать пригодные для моделирования в MLCM3 массивы данных малой дискретности для рек РФ открывает практически безграничные возможности для адаптации и внедрения на территории страны.

VI. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В СИСТЕМЕ ФПС

Вопрос визуализации полученных результатов ФПС не так прост как кажется и тоже требует комплексного подхода, ведь исходящие из системы прогностические данные должны интерпретироваться корректно не только узкими специалистами, но и специалистами других ведомств, потребителями, населением. Исходя из данного положения имеет смысл выдвинуть следующие требования к визуализации выходных прогностических данных из системы ФПС для «рядовых потребителей»:

- большой объем разнородных данных должен быть представлен в виде неспецифичных графических образов (оконтуренные зоны подтоплений и затоплений территории, графики, диаграммы, интерактивные карты с простым интерфейсом, маркировка зон подтопления на местности по меткам высоких вод), четко и однозначно поддающиеся трактовке потребителем;
- организация системы связи визуализаций полученных результатов с каналами связи: Интернет, системы оповещения о ЧС, операторы сотовой и мобильной связи, СМИ;
- унификация и однородность предоставляемых данных, которая способствовала бы формированию привычки корректного толкования потребителем прогностической продукции;
- создание единой платформы (или системы регионального, локального порядков) для публикации и доведения до сведения максимального числа потребителей прогностической продукции;
- учёт доступности прогностической продукции для всех групп населения, а том числе создание систем персонального оповещения заинтересованных лиц.

Для визуализации специализированной прогностической продукции необходимо удовлетворить дополнительные требования:

- формирование простого, интуитивно понятного интерфейса всего блока программного обеспечения, позволяющего достигать максимальной скорости принятия управленческих решений и процедур визуализации прогностической продукции, максимальная автоматизация этих процессов на базе оперативных центров по обработке прогностической информации;
- все данные должны храниться и анализироваться в современных ГИС-системах, с использованием СУБД с поддержкой

пространственных данных (OracleSpatial, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL и др.);

- межсистемное взаимодействие на базе общедоступных геоинформационных сервисов (GeoServer; MapServer; ArcGIS Server; Oracle Map Viewer);
- интеграция со сторонними телекоммуникационными системами.

На рисунке 6.1 представлена логистическая схема доведения прогностической информации до стадии визуализации и основные ее типы [39].

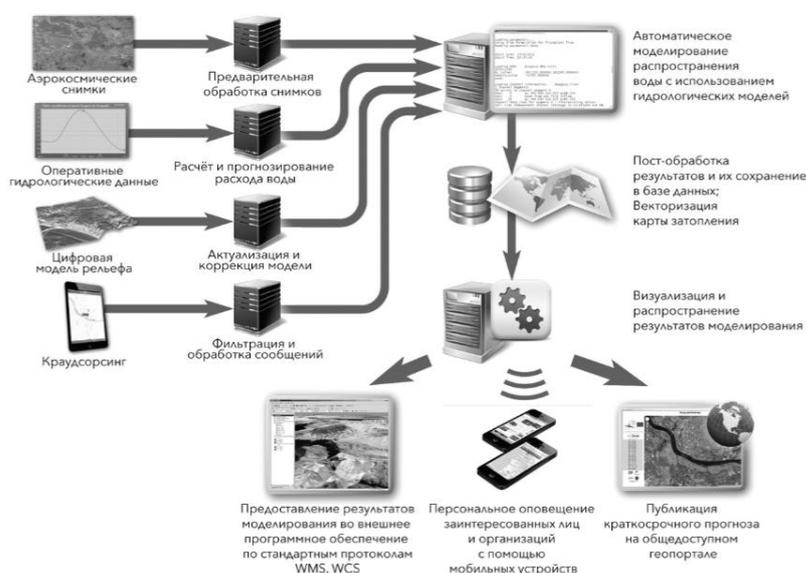


Рисунок 6.1 – Логистическая цепь доведения прогностической продукции до стадии визуализации

Центральную роль в процессе визуализации прогностической информации в современном технологичном мире конечно должны занимать ГИС-системы, принципиальная схема визуализации прогностической информации с их помощью представлена на рисунке 6.2 [51].

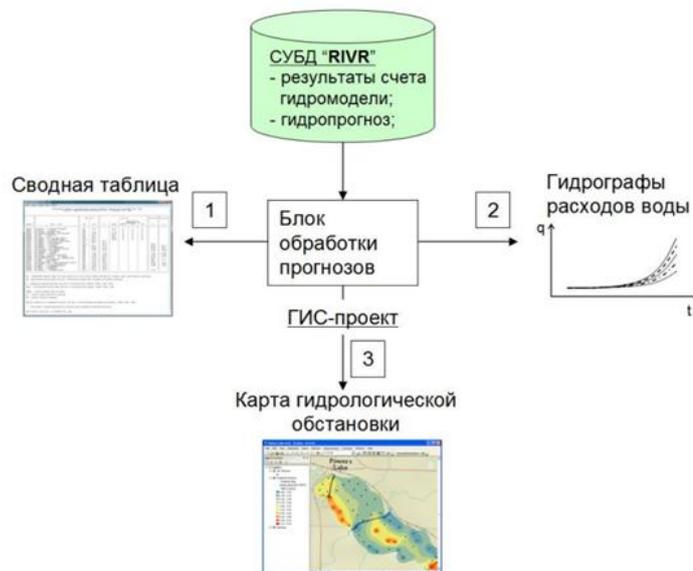


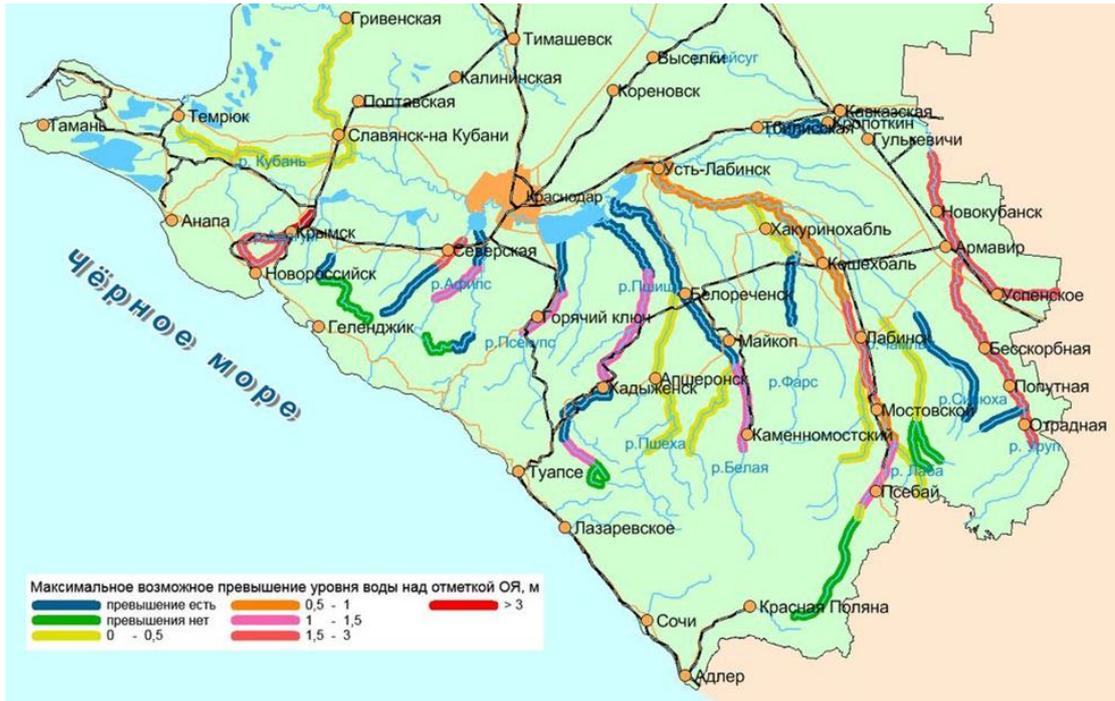
Рисунок 6.2 – Принципиальная схема визуализации прогностической информации с помощью ГИС-систем

На данный момент существуют три самых распространенных графических представления прогностической информации: прогностические гидрографы стока, статические и динамические карты гидрологической обстановки, визуализация зон затопления и подтопления территории.

А)



Б)



В)

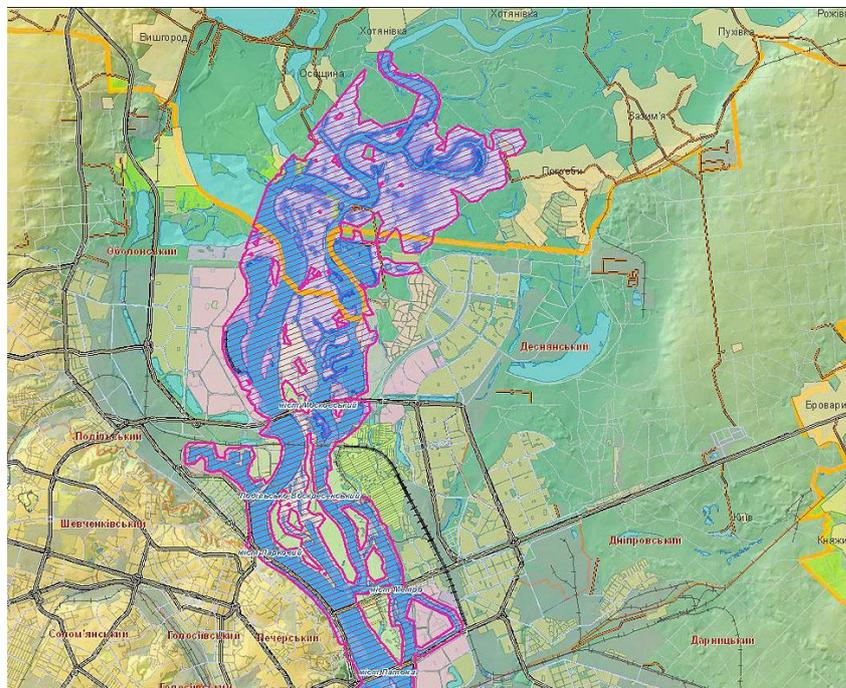


Рисунок 6.3 – Основные способы визуализации прогноза развития паводковой ситуации (А – прогнозный гидрограф стока с нанесением градаций уровня опасности; Б – карта гидрологической обстановки; В – визуализация зон затопления).

Предложенная на рисунке 6.3А схема визуализация градаций опасности паводковых расходов воды вошла в итоговую технологическую цепь системы ФПС на равне с применением динамической карт паводковой опасности по образу карт прогнозных осадков (ноукастинг) представленных в [54] и на рисунке 6.4. Стоит также отметить сложность внедрения на общенациональном уровне профессиональных ГИС-технологий на базе платных программных продуктов типа ArcGIS, тем не менее в последнее время активно расширяются возможности бесплатных аналогов, таких как QGIS и NextGIS, использование которых тоже рекомендуется в описываемой системе ФПС.

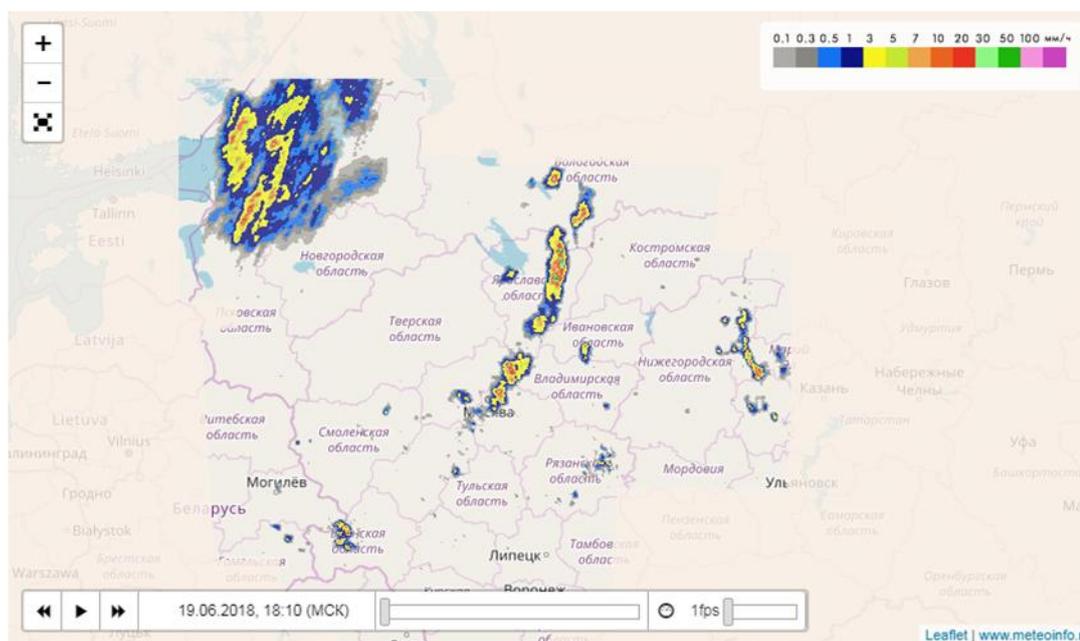


Рисунок 6.4 – Ноукастинг прогов осадков на 2 часа с официального сайта Гидрометцентра РФ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения задач, обозначенных во Введении, была планомерно проделана следующая аналитическая работа:

- изучены проблематика ФПС на территории РФ, международный опыт создания систем ФПС; действующие отечественные и зарубежные методики прогнозирования быстроразвивающихся паводков, стока весеннего половодья;
- рассмотрены вопросы сбора, обработки и анализа данных, входящих в состав технологической цепи системы ФПС (данные наземных наблюдений, радарного зондирования, спутникового зондирования, аэрофотосъемок и съемок с БПЛА, выходные данные мезомасштабных моделей погоды а также гидродинамических моделей);
- выполнен аналитический обзор имеющихся моделей прогнозирования паводочного стока, стока весеннего половодья и связанных с ними мезомасштабных метеомоделей – международный опыт и проблемы его адаптации на территории РФ;
- представлены способы визуализации прогностической информации с помощью ГИС-систем.

Каждой из этих проблем соответствуют главы работы.

Помимо всего вышеизложенного, была решена специфическая задача по оценке ежечасной эвапотранспирации с поверхности водосбора р. Мзымта – п. Красная Поляна по методике FAO, рекомендованной ВМО, полностью отражающей физическую сущность такого сложно процесса. Это можно назвать важным достижением, так как наблюдения за процессами испарения с поверхности суши с последующей передачей данных в режиме реального времени на территории РФ в общенациональном масштабе практически невозможны, даже в далекой перспективе. Расчетные же методы, практиковавшиеся до этого, не позволяли производить вычисления с

настолько малой дискретностью (1 час). Расчетный метод, использующийся в работе, не требует больших оперативных ресурсов, а входными данными для него являются 10-12 стандартных метеорологических параметров, наблюдения за которыми ведутся на АМК Росгидромета ежечасно. Погрешность метода на примере данных за 2002 год по станции Красная Поляна по сравнению с методом Константинова составила всего 5,5%. Исходя из всего сказанного, можно с уверенностью предположить, что получаемые таким образом данные по эвапотранспирации достоверны для использования в модели MLCM3, которая является базовой в рассматриваемой системе ФПС. В дальнейшем это открывает перспективы расчетов ФПС с малой заблаговременностью (5-6 часов) на территории РФ с использованием модели MLCM3.

Планомерное выполнение аналитической и расчетной работы позволило сформировать технологическую цепочку, включающую оперативные связи системы ФПС вида «данные-модели-прогнозирование-визуальное представление результатов», представленную в Приложении Г. Характерными особенностями разработанной системы является:

- стремление к максимальному уменьшению заблаговременности прогноза;
- отказ от прогнозирования хода уровней воды в реке в пользу прогнозирования расходов, для которых на региональном и локальном уровнях вводятся градации опасности в соответствии с площадью водосбора реки и его гидроморфологических особенностей. Этот факт существенно упрощает прогнозирование развития паводков на малоизученных с гидрологической точки зрения территориях, которых на территории страны большинство. В дальнейшем, с прогрессом в создании ЦМР в общенациональном масштабе, будет возможен плавный и безболезненный переход к привычной уровенной системе прогнозирования;

- гидродинамическая модель MLCM-3, положенная в основу системы, при сравнительно низком уровне обеспеченности исходными данными, способна выдавать корректные результаты численного моделирования, проверенные на ретроспективных данных.

Резюмируя, можно сказать, что на территории нашей страны есть перспектива создания полностью автоматизированной системы ФПС, которая будет являться основой для более точных прогнозов развития паводков. Для ее создания прежде всего необходима сеть гидрометеорологических наблюдений высокой пространственно–временной дискретности, которая активно формируется на территории страны за счет программы модернизации. На данный же момент недостаточным для создания действенной системы ФПС является число АГК Росгидромета, а также численность группировки спутников ДЗЗ, систем метеорадаров (которая на данный момент не покрывает и 20% территории страны). Развитая сеть гидрометеорологических наблюдений, передающая данные в режиме реального времени в автоматическом режиме – основа создания надежной и функциональной системы ФПС. Этот фактор можно назвать лимитирующим, и все действия по созданию сопутствующей инфраструктуры вторичны по сравнению с ним. Тем более, что на данный момент все остальные звенья технологической цепочки подкреплены качественными научными изысканиями и практически готовы к внедрению.

Работа получилась объемной, не стоит скрывать и того, что компетенции в некоторых вопросах хватало не всегда, но данная будет продолжена на базе нового Прогностического Отдела ГГИ, в котором автор работы хотел бы продолжить исследования уже в рамках аспирантуры. Поэтому представленную версию системы ФПС можно назвать скорее временной для переходного периода дефицита надежных источников гидрометеорологической информации с необходимыми характеристиками. Успешное завершение и практическое внедрение описанных в диссертации

противопаводковых систем позволит не только повысить гидрометеорологическую безопасность значительной части территории нашей страны и её экономики, но и существенно сократить отставание РФ от развитых стран в гидрометеорологической области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Официальный веб-сайт Информационного агентства России ТАСС [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://tass.ru/info/4291130>;
- 2 Официальный сайт Национального Центра Водных Проблем [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://npncsvr.ru/pavodki-navodnenia-info.html>;
- 3 Бефани А.Н., Тигинян А.Г. Инфильтрация на горных склонах Северного и Западного Кавказа. Сб. Проблемы расчёта и прогнозирования паводков, тезисы докладов, Одесса; 1980;
- 4 Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. Москва, 2014;
- 5 Семенов В. А., Семенова И. В., Аванесян Р. А., Дегтяренко Т. И. Особенности климатически обусловленных изменений опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на реках горных территорий России // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 215 – 230;
- 6 Доброумов Б.М., Тумановская С.М. Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. – 2002. – №12. – С. 70-78;
- 7 Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения в мире в последние годы XX столетия. // Водные ресурсы. – 2000. – №5. – С. 517-523;
- 8 Бузин В.А. О наводнениях на реках, вызванных заторами льда. // Водные ресурсы. – 2000. – №5. – С. 524- 530;
- 9 Семенов В. А. География климатообусловленных изменений опасных наводнений на реках России в конце XX – начале XXI столетий // Труды ФГБУ «ВНИИГМИМЦД». 2014. Вып. 177. С. 160 – 174.
- 10 Алисов Б. П. Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1956. 128 с.;
- 11 EM-DAT: Annual Disaster Reviews from 2006 to 2016 years / Centre for Research on the Epidemiology of Disasters CRED. Université Catholique

de Louvain, Brussels, Belgium. ;

12 Guha-Sapir D., Hargitt D., and Hoyois Ph., 2003. Thirty years of natural disasters 1974–2003. UCL Presses Universitaires de Louvain, CRED-UCL, 190 p.;

13 Guide to Hydrological Practices. Fifth edition [Text] / World Meteorological Organization.–Geneva.–WMO No. 168.–1994.–739 p.;

14 Seo, D.-J. Real-time variational assimilation of hydrologic and hydrometeorological data into operational hydrologic forecasting [Text] / D.-J. Seo, V. Koren, L. Cajina // Journal of Hydrometeorology.–2003.–No. 4.–P.627 – 641.;

15 Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Макин И.С., Сергеенко С.Ю., Румянцев Д.Ю. Фоновое прогнозирование стока в режиме близкому к реальному времени [Текст]// Ученые записки РГГМУ. – Санкт-Петербург, 2005. – Ном. 22. – С. 2-8.;

16 Официальный веб-сайт Метеобюро Правительства Австралии [Электронный ресурс] // Australian Government Bureau of Meteorology.–Melbourne.–Режим доступа: <http://www.bom.gov.au>;

17 Официальный веб-сайт Экологического управления Финляндии [Электронный ресурс] // Helsinki.–Режим доступа: <http://www.p2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>;

18 Официальный веб-сайт Метеорологической службы Великобритании [Электронный ресурс] // UK Met Office.–Exeter.–Режим доступа: <http://www.metoffice.gov.uk>;

19 Официальный веб-сайт Национальной Службы Погоды США [Электронный ресурс] // U.S. NOAA National Weather Service.–Silver Spring.–Режим доступа: http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcdev/docs/VAR_wgrfc_doh.pdf;

20 Официальный веб-сайт Японского метеорологического агентства [Электронный ресурс] // Токуо.–Режим доступа: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>;

21 Francesco Dottori, Peter Salamon, Milan Kalas, Alessandra Bianchi, Jutta Thielen, Luc Feyen [Text] A near real-time procedure for flood hazard mapping and risk assessment in Europe // European Commission, Joint Research Centre.–Ispra.– Italy, 2015;

22 Официальный веб-сайт Казгидромета [Электронный ресурс] Интервью научный сотрудника отдела гидрологического прогнозирования и водных ресурсов ВМО Айхана Саина // Казахстан.– Режим доступа: <https://kazhydromet.kz/ru/>;

23 The experience in Spain during the process of the Floods Directive implementation [Presentation] // José García Rodríguez, Spanish Ministry of Agriculture and Fisheries, Food and Environment.–Spain,2017;

24 Flood plan guidance for communities and groups [Text] // Environment Agency.–UK,2012;

25 The Role of ICT in the Establishment of Flood Early Warning System in Nigeria [Text] // Materials of the Climate Change and ICT Conference.– Okuku, Nigeria,2012;

26 Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA) [Text] // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science.– Volume 18, Issue 2, December 2015, Pages 261-278;

27 Логунов О.Ю., Вильдяев В.М. Проблемы управления паводками на территории России [Текст] // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов России» №3.–Москва, 2008;

28 Кузьмин В.А., Галкин И.А., Дикинис А.В., Шилов Д.В., Сурков А.Г. Автоматизированная поддержка принятия решений на основе ансамблевых гидрометеорологических прогнозов [Текст] // Учёные записки РГГМУ, Вып.29.,стр. 206-209.–Санкт-Петербург, 2013;

29 Магрицкий Д.В., Самохин М.А., Юмина Н.М. Наводнения в Краснодарском крае и республике Адыгея [Текст] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник).–Ном.4.,стр 44-63,-Краснодар,2013;

30 Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани [Текст] // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ.–Ном. 356.,стр. 1-257.–Москва, 2014;

31 Зенкин О.В., Мелкий В.А. Моделирование и прогнозирование наводнений в городах Дальнего Востока, вызванных весенними паводками и тропическими циклонами [Текст] // Труды Сахалинского филиала Дальневосточного геологического института ДВО РАН.–Владивосток, 2005;

32 Официальный веб-сайт автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство водных ресурсов.–Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru>;

33 Официальный веб-сайт Росгидромета [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.– Режим доступа: <http://www.meteorf.ru>;

34 Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата) [Текст] // Материалы VI Метеорологического съезда, Санкт-Петербург, 2009 г., 77 с.;

35 Сайт приложения Rain Viewer [Электронный ресурс] // Lucky Apps, 2018 .–Режим доступа: <https://www.rainviewer.com/ru/>;

36 Официальный веб-сайт ФГБУ НИИ Планета [Электронный ресурс] // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.– Режим доступа: <http://planet.iitp.ru/index.html>;

37 Кузьмин В.А., Полякова А.А., Ерёмина С.В., Гаврилов И.С., Рошет Н.А. Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах РФ [Текст] //

Ученые записки РГГМУ. – Санкт-Петербург, 2005. – Том. 29. – С. 29-35.;

38 Ebert E.E. and Weymouth G.T., 1999, Incorporating Satellite Observations of "NoRain" in an Australian Daily Rainfall Analysis, [Text] // J. Appl. Meteor., 38, 1, 44-56.;

39 Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных [Текст] // Труды СПИИРАН., Вып. 4(41)–Санкт-Петербург, 2015;

40 Официальный веб-сайт Российского НИИ Развития общественных Сетей [Электронный ресурс] // РосНИИРОС.–Режим доступа: <http://www.ripn.net/index.html>;

41 Suresh Kumar, A. Singh, D. P. Shrestha. Modelling spatially distributed surface runoff generation using SWAT-VSA: a case study in a watershed of the north-west Himalayan landscape [Text] // Modeling Earth Systems and Environment.–Volume 2, Issue 4, p. 1–11.– India, 2016;

42 Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии [Текст] // Виноградов Ю.Б.– М.: Академия, 2010.–304 с.;

43 Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. [Текст] // Владивосток: Дальнаука, 2008.–223 с.;

44 Коваленко, В.В. Измерение и расчет характеристик неустановившихся речных потоков [Текст] / В.В. Коваленко.–Л.: Гидрометеиздат, 1984.– 160 с.

45 D.J. Barrett, V.A. Kuzmin, J.P. Walker, T.R. McVicar and C. Draper. Improving stream flow forecasting by integrating satellite observations, in situ data and catchment models using model-data assimilation methods [Text] // The Australian Government Bureau of Meteorology. eWater Cooperative Research Centre Technical Report.–Australia, 2008;

46 Корень В. И., Бельчиков В. А.. Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей [Текст] // Государственный комитет СССР по гидрометеорологии.– Гидрометиздат.–Ленинград, 1989;

47 Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г., Смахтин В.Ю., Назаров Н.А. Применение физико-математических моделей формирования речного стока для оценки степени опасности катастрофических наводнений [Текст] // Метеорология и гидрология.–Изд. Планета, № 4,с. 93-100.–Москва, 1994;

48 Соколова Д.В., Кузьмин В.А., Симановская М.В.. Программное обеспечение «MLCM2» для прогнозирования дождевых паводков на малых и средних водосборах [Текст] // ученые записки РГГМУ № 40, с.55-60.– Санкт-Петербург, 2015;

49 Официальный веб-сайт The Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO) [Электронный ресурс] // ООН.–Режим доступа: <http://www.fao.org/contact-us/en/>;

50 Официальный веб-сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных ГУ ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.– Режим доступа: <http://www.meteo.ru>;

51 Официальный веб-сайт The World Radiation Data Centre (WRDC) [Электронный ресурс] // WMO.–Режим доступа: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>;

52 Daria Sokolova, Vadim Kuzmin, Artur Batyrov, Inna Pivovarova, Ngoc Anh Tran, DinhKha Dang, Kirill V. Shemanaev. Use of MLCM3 Software for Flash Flood Modeling and Forecasting [Text] // Journal of ecological Engineering; Volume 19, Issue 1, January 2018, pages 177–185;

53 Борщ С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А.. Представление выходной продукции оперативных гидрологических прогнозов в ГИС

[Текст] // Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации.–Москва, 2014;

54 Официальный веб-сайт Гидрометцентра РФ [Электронный ресурс]
// Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды.– Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/nowcasting>;

