

*На правах рукописи*

ПУТИНЦЕВ Лев Александрович

**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ, МОДЕЛИ И РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ  
БОКОВОГО ПРИТОКА В БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

Специальность 1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель:  
доктор географических наук, профессор  
Бураков Дмитрий Анатольевич

Красноярск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА БОКОВОГО ПРИТОКА БОГУЧАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Рельеф, почвы и растительность .....	9
1.2 Климатические условия. ....	13
1.3 Гидрологическая изученность.....	15
1.4 Снегонакопление .....	16
1.5 Условия формирования стока в бассейне водохранилища .....	21
1.6. Физико-географическая характеристика бассейнов рек-аналогов	24
<b>ГЛАВА 2. РАСЧЕТ СУТОЧНОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС .....</b>	<b>33</b>
2.1 Обзор существующих предложений по расчетам ежедневного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.....	33
2.2 Оценка бокового притока методом водного баланса .....	34
2.3 Расчет бокового притока гидрометрическим методом .....	39
2.4 Сравнение оценок бокового притока в Богучанское водохранилище, полученных разными методами.....	42
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА КВАРТАЛЬНОГО БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ.....</b>	<b>45</b>
3.1 Выбор предикторов и прогноз бокового притока по линейной регрессионной модели его зависимости от метеорологических факторов.....	45
(способ 1).....	45
3.2 Прогноз бокового притока в Богучанское водохранилище с использованием его корреляции со стоком рек-аналогов (способ 2) ....	51

3.3 Прогноз бокового притока с применением элементов инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова (способ 3).....	56
<b>ГЛАВА 4. КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ ...</b>	<b>62</b>
4.1 Классификация моделей формирования стока .....	62
4.2 Основные положения концептуальной модели Д.А. Буракова .....	64
4.3 Комментарии к реализации отдельных фрагментов модели.....	66
4.4 Оценка параметров модели по материалам наблюдений.....	73
за 1977-2012 гг. ....	73
4.5 Испытание модели на независимых данных за 2013-2021 гг. ....	75
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>80</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>91</b>
Результаты расчета бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал.....	91
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>94</b>
Моделирование гидрометеорологических характеристик в Богучанском водохранилище за второй квартал.....	94
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>98</b>
Оценки относительной заснеженности бассейна Богучанского водохранилища по данным космического мониторинга.....	98
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>101</b>
Таблицы коэффициентов парной корреляции.....	101

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Анализ механизмов формирования речного стока в разных физико-географических условиях – классическая задача гидрологии суши. Для территорий, слабо освещенных данными натурных наблюдений, решение этой задачи признано мировым научным сообществом одной из ключевых и нерешенных проблем гидрологии (см. материалы научного десятилетия Международной ассоциации гидрологических наук, обобщенных в монографии «Runoff Prediction in Ungauged Basins Synthesis across Processes, Places and Scales»). К территориям с недостатком данных мониторинга относятся речные бассейны Азиатской части России, для многих из которых знание факторов формирования речного стока и создание на этой основе физически обоснованных методов прогноза водного режима рек имеет большое значение вследствие нарастающих темпов вовлечения водных ресурсов в социально-экономическое развитие этих территорий. Богучанская ГЭС, введенная в эксплуатацию в 2014 г и предназначенная для покрытия дефицита растущего энергопотребления в связи с развитием в регионе Нижнего Приангарья энергоёмких производств – пример такого развития. Ввод Богучанской ГЭС на полную мощность состоялся в 2015 году.

При нормальной эксплуатации Богучанской ГЭС уровень водохранилища допускается изменять в диапазоне от 207,00 до 208,00 м. БС. При таком диапазоне нормативно допустимых изменений уровня для предотвращения ситуаций, связанных с переполнением Богучанского водохранилища, требуются надежные прогнозы бокового притока воды. Таким образом, исследование факторов формирования речного стока на водосборе Богучанского водохранилища и создание методик долгосрочного и краткосрочного прогноза бокового притока воды в это водохранилище – актуальная научная задача, имеющая важное практическое значение. Диссертационная работа направлена на решение этой задачи.

**Степень разработанности темы исследования.** Оснащенность бассейна водохранилища пунктами измерений стока воды слабая. Подробные гидрометрические наблюдения на малых реках в бассейне водохранилища производились с 1977 по 1987 год. В этот период Е.А. Шатуновой, А.И. Афанасьевым, В.А. Жоровым и др. были предложены варианты методик, предназначенных для расчета бокового притока в строящиеся Богучанское водохранилище. После 1987 года наблюдения за стоком малых рек в бассейне водохранилища не производились, по этой причине разработанные методики расчета и прогноза бокового притока требуют переработки с учетом изменившейся ситуации по информационному обеспечению такой задачи.

**Цель исследования** – анализ условий формирования речного стока на водосборе бокового притока Богучанского водохранилища и уточнение на этой основе методик расчета и прогноза бокового притока в водохранилище с учетом действующей в настоящее время сети пунктов гидрометеорологических наблюдений.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- анализ условий формирования речного стока на водосборе бокового притока Богучанского водохранилища по данным гидрометеорологического мониторинга и спутникового зондирования земной поверхности
- разработка методики расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС в условиях недостаточности гидрометрических наблюдений;
- разработка физико-статистических методик долгосрочного прогноза объёма бокового притока в период половодья;
- разработка методики краткосрочного прогноза суточного бокового притока воды в исследуемое водохранилище за период открытого русла с применением концептуальной модели формирования стока.

**Научная новизна и теоретическая значимость работы** состоят в установлении взаимосвязей характеристик речного стока с обуславливающими его

физико-географическими факторами и построении на этой основе физико-статистических и математических моделей прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС в условиях слабой гидрометеорологической изученности прилегающей территории.

**Практическая значимость** работы обусловлена ее направленностью на повышение качества гидрометеорологического обеспечения работы Богучанского гидроузла с учетом требований его технической и экологической безопасности.

**Методы исследований.** В работе реализованы методы водного баланса и гидрологической аналогии, методы математической статистики и математического моделирования. Комплексная обработка картографических материалов выполнялась с применением ГИС-технологий. Использовались математические методы и программные средства обработки и представления данных. В основу методики краткосрочного прогноза бокового притока положена используемая в сибирских УГМС концептуальная модель формирования стока Д.А. Буракова.

**Исходные данные:**

- результаты многолетних гидрометеорологических наблюдений сети станций и постов Красноярского и Иркутского УГМС;
- литературные источники, посвященные решению проблем расчета и прогноза бокового притока Богучанского водохранилища;
- материалы сибирского центра НИЦ «Планета» по мониторингу заснеженности (ГИС космического мониторинга В.Ю. Ромасько).

**Защищаемые положения:**

1. Установлено, что в бассейне Богучанского водохранилища влияние временного хода осадков за период снеготаяния, а также сопутствующего хода температуры воздуха, оказывается существенно меньшим, чем влияние условий, сложившихся к началу снеготаяния. Эти особенности стокообразования на исследуемой территории создают физическую основу для увеличения точности прогноза бокового притока воды в водохранилище за период половодья.

2. Показано, что основные факторы формирования потерь стока весенне-летнего половодья в бассейне нижней Ангары – влажность и глубина промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния в отсутствие данных прямых измерений могут быть заменены косвенными показателями, такими как сток и температура почвы за предшествующий осенний период, сумма положительных температур в марте.

3. Разработаны физико–статистические методики предсказания бокового притока во втором квартале, основанные на анализе гидрометеорологической информации. Прогнозные методики демонстрируют хорошее качество прогнозов, оцениваемых согласно стандартным критериям Росгидромета.

**Достоверность и обоснованность полученных в работе выводов** определяется использованием данных регулярных наблюдений Росгидромета (температура воздуха, атмосферные осадки, уровни и расходы воды), а также применением современных методов статистического анализа и концептуальной модели формирования речного стока, стандартных методов поверки гидрологических прогнозов, принятых в Росгидромете.

**Личный вклад автора.** Систематизация первичных гидрометеорологических данных за 1977–2021 годы, разработка методик краткосрочного и долгосрочного прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС, формулировка выводов. При опубликовании работ в соавторстве автор участвовал в постановке задач, обработке, анализе и интерпретации результатов расчётов.

**Публикации по теме диссертации.** По результатам исследований опубликовано 8 научных работ, из них 3 статьи в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией и 5 работ в сборниках материалов конференций.

**Апробация работы.** Результаты исследования обсуждались на конференциях различного уровня: Научно-практическая школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии (Новосибирск, 2012); VII

Всероссийский гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2013); VIII Всероссийская конференция с международным участием, посвященная Всемирному дню Земли и Российскому Году охраны окружающей среды "География и геоэкология на службе науки и инновационного образования" (Красноярск, 2013); XII конференция, посвященная Международному дню воды (Красноярск, 2017), ряд семинаров в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (Красноярск);

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, включает 24 рисунка, 31 таблицу (из них 4 рисунка, 7 таблиц в приложениях), списка литературы (99 наименования), 4 приложения, объём диссертации составляет 91 страницу.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю зав. кафедры природообустройства Красноярского государственного аграрного университета, профессору, д.г.н. Д.А. Буракову за предоставленную интересную тему, за научное руководство и помощь на всех этапах выполнения исследования. Также автор искренне благодарит начальника Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС» И.Н. Гордеева за ценные замечания и предложения в ходе проведения исследования, участие в обсуждении полученных результатов, рецензентов работы. Особую благодарность автор выражает д.г.н. А.В. Игнатову, за поддержку и помощь на заключительных этапах работы.



# ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА БОКОВОГО ПРИТОКА БОГУЧАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

## 1.1 Рельеф, почвы и растительность

Бассейн бокового притока Богучанского водохранилища (площадь 47000 км<sup>2</sup>) расположен в Приангарской провинции на участке с координатами: 57–59 град. с.ш. и 99–103 град. в.д. [77]. Богучанская ГЭС осуществляет суточное и сезонное регулирование стока Ангары. В условиях нормальной эксплуатации диапазон колебаний уровня воды водохранилища не должен превышать величину в один метр.

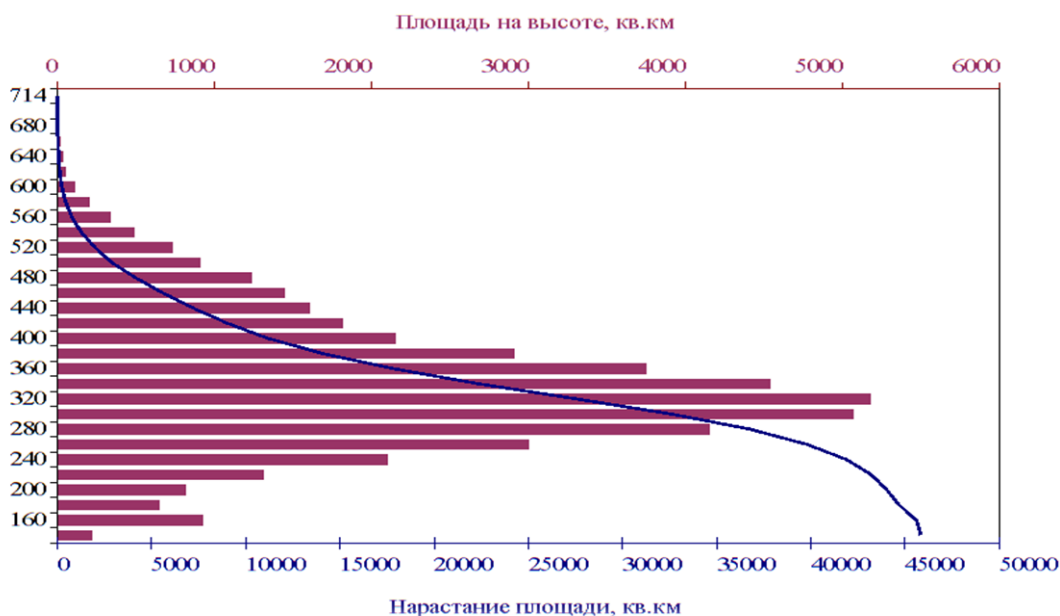


Рисунок 1.1 - Гипсографическая кривая и распределение высот бассейна Богучанского водохранилища

На рисунке 1.1 показана гипсографическая кривая бассейна Богучанского водохранилища, полученная по данным цифровой модели рельефа (ЦМР) ГТОРО. Богучанское водохранилище на ЦМР отсутствует — его на момент создания ЦМР ещё не было — поэтому высоты включают дно водохранилища.

В бассейне водохранилища с использованием ГИС выделены три высотные зоны (таблица 1.1). Первую зона (до 208 м), занимает, собственно, водохранилище. Высотные отметки на водосборе лежат в диапазоне от 208 до 650

метров. На востоке, в междуречье Ангары и Подкаменной Тунгуски, находится возвышенная часть бассейна с высотами от 400 до 600 м. Другая возвышенность расположена на левом берегу р. Ангары в верховьях бассейна р. Ковы. Это Ковинский кряж с высотами до 650 м (рисунок 1.2).

Таблица 1.1 –Высотные зоны рельефа в бассейне бокового притока Богучанского водохранилища

Диапазон высот, м	Площадь, тыс. км <sup>2</sup> /%
<208 (зеркало водохранилища при НПУ)	2,3/5,0
208 – 400	32,8/71,3
400 – 650	10,9/23,7

В бассейне водохранилища встречается небольшое количество озер, их регулирующее влияние на сток рек незначительно. Заболоченность территории невелика, болота расположены на плоских водоразделах и на пологих склонах.



Рисунок 1.2 – Фрагмент карты-схемы с бассейном бокового притока Богучанского водохранилища

Примечание: 1-Богучанская ГЭС, 2-Усть-Илимская ГЭС

Притоки Ангары характеризуются достаточно выработанными долинами с извилистыми руслами. В среднем течении встречаются болотистые надпойменные террасы и широкие поймы.

В геологическом отношении берега водохранилища разнообразны. Правобережная зона более крутая, чем левобережная. Для правого берега склоны имеют крутизну более 11 градусов, причем крутые берега сложены скальными и полускальными горными породами.

Пологие склоны крутизной 0–2 градуса, формирующиеся в рыхлых четвертичных отложениях, составляют около 30 %. Они преобладают в северной части бассейна в пределах Кежемского и Тургеневского расширений долины. В сужениях долины береговые склоны сложены скальными и полускальными горными породами. [80]

Исследуемая территория расположена в пределах Приангарского плато в зоне южной тайги, где преобладает светлохвойный лес с наибольшим распространением сосны. Согласно почвенно-географическому районированию, зону водохранилища можно отнести к Приангарской провинции дерново-подзолистых, дерново-лесных оглеенных длительно-сезонно-мерзлотных почв [67]. Характерной особенностью материнских пород является насыщение их основной массы карбонатными легкорастворимыми солями.

В зоне водохранилища преобладают дерново-подзолистые и подзолистые почвы, а в западной части больше почв глинистого и тяжелосуглинистого механического состава. В Кежемском районе состав почв преимущественно суглинистый и супесчаный. Почвы этих типов имеют небольшой гумусовый горизонт от 5 до 15 см, подзолистый горизонт от 10 до 20 см. Второй гумусовый горизонт мощностью от 10 до 15 см достаточно редко залегает в слабоподзолистых почвах с глубины 25–30 см.

Почвы, в том числе и затопленные водохранилищем, – мощные, темно-серые оподзоленные. Значительный гумусовый горизонт и достаточное количество питательных веществ имеют глубоко дерновые слабоподзолистые и пойменные высоко гумусовые, тяжелосуглинистые и среднесуглинистые почвы.

Сенокосные угодья имеют хорошее увлажнение и достаточный запас питательных веществ и располагаются на дерново-луговых, пойменно-луговых, лугово-болотных и перегнойно-болотных почвах.

Агрогидрологические свойства почв следующие:

- **дерново-лесные** (глина и тяжелый суглинок) почвы: общая скважность – 47%, удельный вес – 2,69 г/см<sup>3</sup>, объемный вес – 1,37 г/см<sup>3</sup>, наименьшая (полевая) влагоемкость – 330 мм, полная влагоемкость – 470 мм, полная влагоемкость от абсолютно сухой почвы – 42 %;
- **дерново-подзолистые** (супесь, средний суглинок, глина и тяжелый суглинок) почвы: общая скважность – 46–54 %, уд. вес – 2,71–2,72 г/см<sup>3</sup>, объемный вес – 1,23–1,45 г/см<sup>3</sup>, наименьшая (полевая) влагоемкость – 180–300 мм, полная влагоемкость – 460–540 мм, полная влагоемкость от абсолютно сухой почвы – 33–40 % [4, 80].

На территории водохранилища и прилегающих районах преобладают сосновые и лиственнично-сосновые леса. Большую часть площади занимают сосновые леса, которые преимущественно относятся к спелым и перестойным насаждениям. Осина, береза и другие лиственные породы произрастают небольшими массивами среди хвойных пород на местах бывших гарей и имеют вторичное происхождение.

На водоразделах Чуна – Ангара, Чадобец – Иркинеева преобладает темнохвойная тайга, которая представлена еловыми, кедровыми и пихтовыми лесами. Подлесок составляют преимущественно шиповник, ольха, ива, рябина. Район водохранилища отличается разнообразием лесного покрова. Сосновые леса с брусничным покровом имеют наибольшее распространение, реже встречается вейниково-разнотравной покров.

Территория поймы Ангары и ее притоков изобилует травянистой растительностью. Здесь на сенокосных угодьях широко распространены злаково-разнотравные и осоково-разнотравные. В долинах небольших речек наибольшее распространение имеют темнохвойные насаждения с густым подлеском из ивы, смородины, черемухи с покровом из багульника, голубики, осок, вейника и

мхов. Территория обычно заболочена и достаточно часто встречаются травянистые закустаренные болота.

Среднегодовая температура пахотного слоя почвы положительная. К середине июня, как правило, на незащищенной пашне наблюдается оттаивание почвы на полную глубину. Температура больше  $10^{\circ}\text{C}$  проникает на глубину до 140 см и в паханом слое держаться около 100 дней.

## 1.2 Климатические условия.

С 80-х годов XX в. согласно данным метеостанции Богучаны, расположенной в 120 км от Богуанского водохранилища, можно отметить положительную динамику увеличения положительной аномалии температуры воздуха. [90, 91]. Это заметно и в годовых значениях температуры воздуха, и в пятилетних периодах (рисунок 1.3). Темпы роста сначала были невысокими, а с 80-х годов температура стала расти гораздо быстрее.

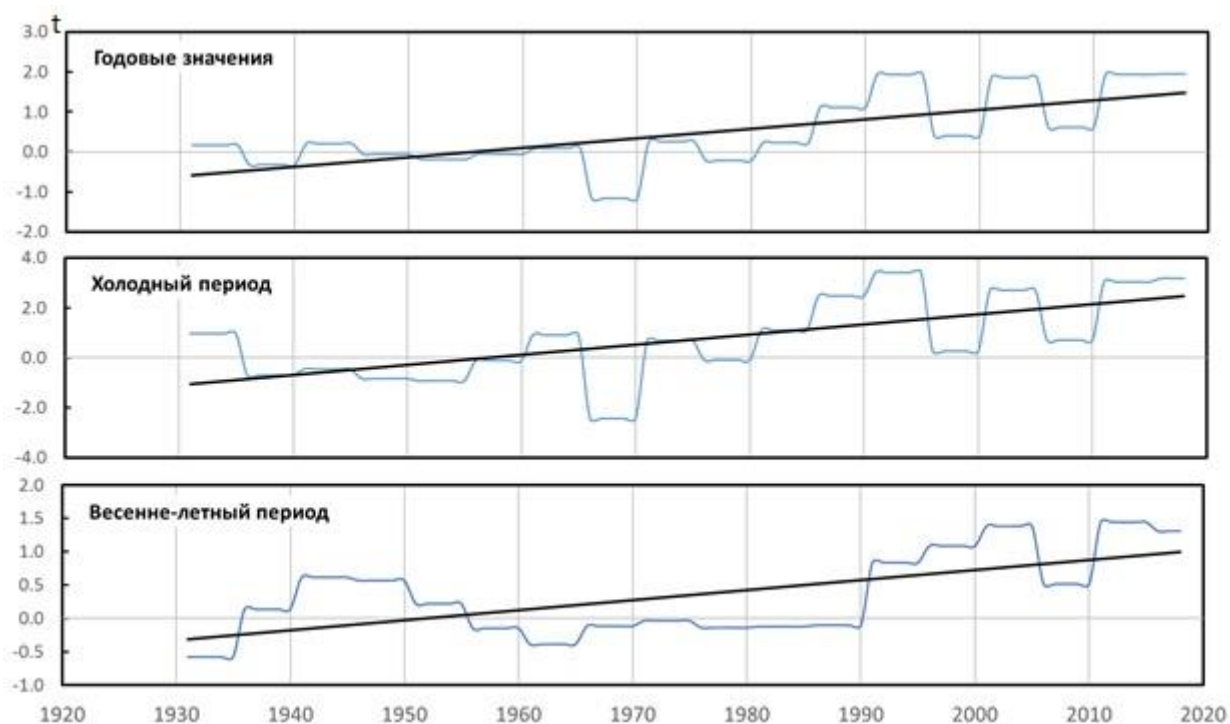


Рисунок 1.3 – Аномалии температуры воздуха по данным М Богучаны (средние пятилетние значения) относительно 1931–1990 гг.

Удаленность водохранилища от морей и океанов обуславливает формирование континентального климата. Циркуляция антициклонального типа преобладает в зимний период, который отличается низкими температурами, слабым ветром и малой облачностью, а также малым количеством осадков. Южная, юго-западная и северо-западная циркуляции циклонального типа преобладают в летний период. В переходные периоды (весна, осень) при частой смене циклонов и антициклонов характерно значительное разнообразие погоды. В целом исследуемая территория отличается холодными зимами. Лето же достаточно теплое (смотри таблицы 1.2 и 1.3).

Таблица 1.2 – Температура воздуха в зоне водохранилища

Метеостанции	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Богучаны	-23,2	-20,8	-12,2	-1,6	6,2	14,6	18,2	14,8	8,5	-1,2	-13,1	-22,2	-2,7
Кежма	-25,6	-22,3	-12,4	-2,8	5,6	14,8	18,8	15,0	7,5	-2,6	-15,6	-24,2	-3,7
Невон	-25,5	-22,8	-13,4	-2,6	6,2	14,1	17,8	14,9	7,1	-2,5	-15,4	-24,8	-3,9

Таблица 1.3 – Даты перехода температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С и продолжительность периодов превышения граничной температуры

Метеостанции	t 0°С и выше		t 5°С и выше		t 10°С и выше	
	период	дни	период	дни	период	дни
Богучаны	21.04–10.10	172	11.05–27.09	138	28.05–9.09	103
Кежма	22.04–09.10	166	14.05–23.09	131	03.04–7.09	95
Невон	25.04–10.10	167	12.05–22.09	132	28.05–6.09	97

На территории бассейна годовое количество осадков составляют в среднем 400 мм. Следуя орографии, сумма осадков уменьшается с северо-востока на юго-запад от 500 до 350 мм. Наименьшие значения сумм осадков в бассейне приурочены к межгорной долине Ангары. В северо-восточной части бассейна на наветренных склонах Заангарского плато (верхнее течение р. Чадобец) выпадает наибольшее количество осадков (450–500 мм).

Годовой ход сумм месячных осадков хорошо выражен: наименьшее их количество выпадает в феврале и марте (10–20 мм), наибольшее – в августе

(около 60 мм). Осенний период характеризуется сравнительно небольшим количеством осадков (таблица 1.4). Тем не менее, в это время из-за снижения испарения, как правило, осуществляется накопление почвенной влаги.

Таблица.1.4 – Среднемноголетнее месячное и годовое количество осадков, мм

Метеостанция	Месячная сумма												Годовая сумма
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Богучаны	10	9,1	8,3	18	32	44	52	54	38	25	19	11	320
Кежда	15	11	9,2	10	24	37	45	56	31	24	28	18	308
Невон	13	6,3	7,2	13	26	46	57	62	32	23	21	14	320

### 1.3 Гидрологическая изученность

Оснащенность бассейна пунктами измерений стока воды слабая как по территории, так и по продолжительности наблюдений. Наблюдения за стоком малых рек в бассейне водохранилища, в настоящее время, не производятся (таблица 1.5). На рисунке 1.4 представлена карта-схема расположения пунктов гидрологических наблюдений за стоком малых рек в бассейне Богучанского водохранилища.

Таблица 1.5 – Характеристика пунктов гидрологических наблюдений за стоком малых рек в бассейне Богучанского водохранилища

№	Река - пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Расстояние от устья, км	Период наблюдений
1	р. Тушама - д. Тушама	3380	3	1957–1987
2	р. Едарма - д. Едарма	2360	3	1976–1987
3	р. Ката - д. Ката	7950	6	1976–1987
4	р. Ката - з. Катинск	5370	65	1986–1987
5	р. Кова - с. Прокопьево	10200	66	1951–1976
6	р. Кода - 7 км от устья	3850	7	1977–1982

По гидрологическому районированию территория водохранилища целиком входит в Нижне-Ангарский гидрологический район [79]. Природные условия на территории водохранилища обусловили довольно развитую речную

сеть (0,4 км на 1 км<sup>2</sup>). Наибольшая густота речной сети наблюдается на участках, граничащих с долинам рек. Преимущественно в верховьях, долины средних и малых рек широкие с очень пологими склонами и заболоченным дном.

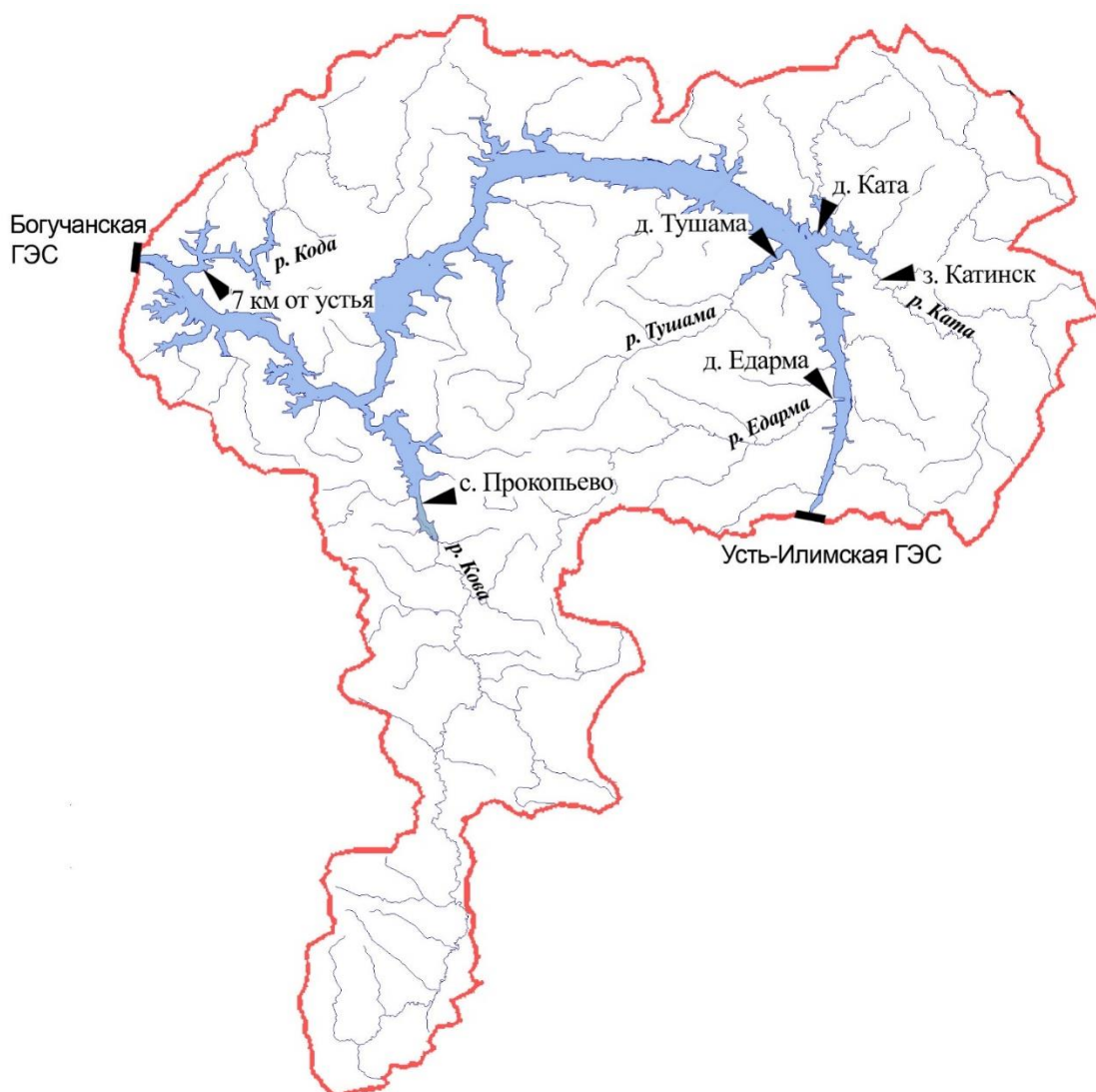


Рисунок 1.4 – Схема гидрологической сети малых рек в бассейне Богучанского водохранилища (Обозначения: ▲ – гидрологические наблюдения; – – граница бассейна Богучанского водохранилища)

#### 1.4 Снегонакопление

Снегонакопление в различных географических районах имеет свои особенности, которые связаны с разнообразием рельефа и растительности.

По результатам исследований А.В. Петенкова (СибНИИГИМ) [66] и на основе данных снегомерных съемок Гидрометеорологической службы построена карта изолиний, приближенно отражающая изменение запаса воды в снеге на территории бассейна Среднего Енисея и Ангары (рисунок 1.5).



Среднемноголетние значения максимального запаса воды в снеге в бассейне Богучанского водохранилища изменяются от 80 до 150 мм. Снег держится в среднем 190 дней.

Водный режим рек в рассматриваемой части Ангарского бассейна характеризуются ярко выраженным весенним половодьем. Запас воды в снеге является самой значимой характеристикой при оценке условий формирования стока весеннего половодья.

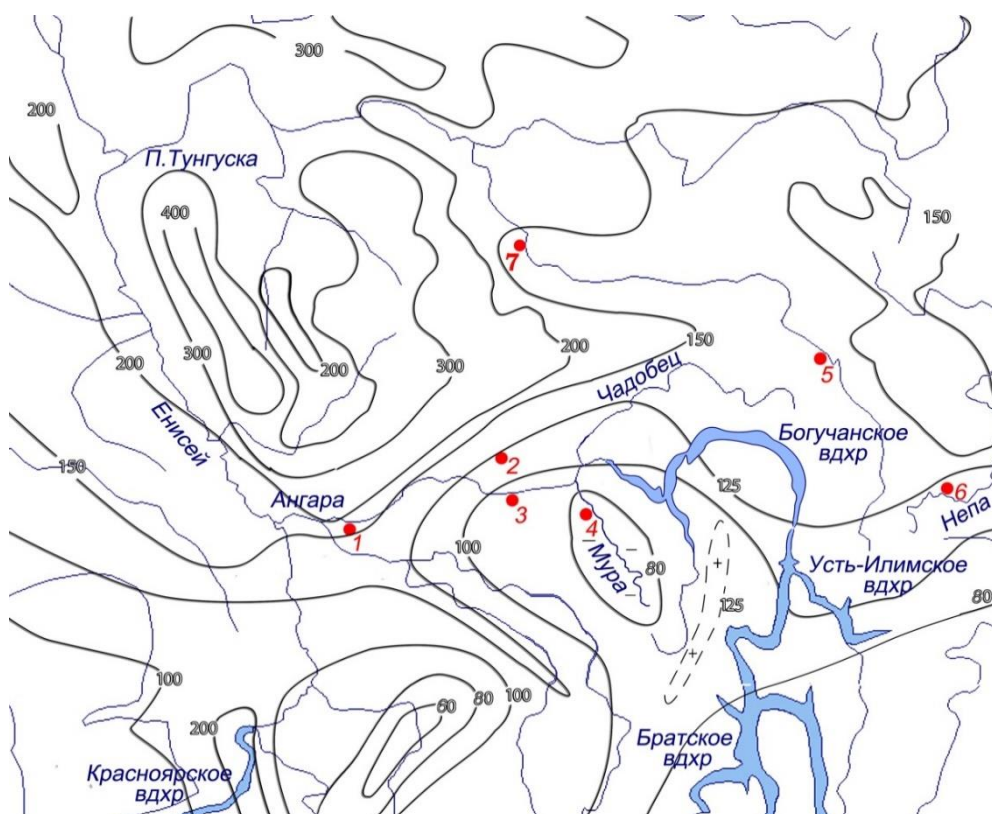


Рисунок 1.5 – Средние многолетние запасы воды в снеге (мм) перед началом снеготаяния

Примечание – метеорологические станции, отмеченные на рисунке: 1-Мотыгино, 2-Бедоба, 3-Богучаны, 4-Ирба, 5-Чемдальск, 6-Токма, 7-Усть-Камо,

Отмечаются следующие фазы в ходе снегонакопления:

1. фаза роста запаса воды;
2. период достижения максимальных за зиму значений;
3. период убыли запасов снега в период снеготаяния.

Средний многолетний сезонный (или годовой) ход запаса воды в снеге (в долях от максимального за холодный период значения) по ближайшим к водохранилищу снегомерным пунктам представлен на рисунке 1.6.

Снегонакопление на прилегающих к бассейну водохранилища территориях начинается обычно в середине октября, максимальный запас снега формируется к концу марта - началу апреля. Сход снега обычно наступает в первой-второй декадах мая. Сдвигка во времени наступления различных фаз снегонакопления и снеготаяния определяется географическим положением пунктов наблюдений.

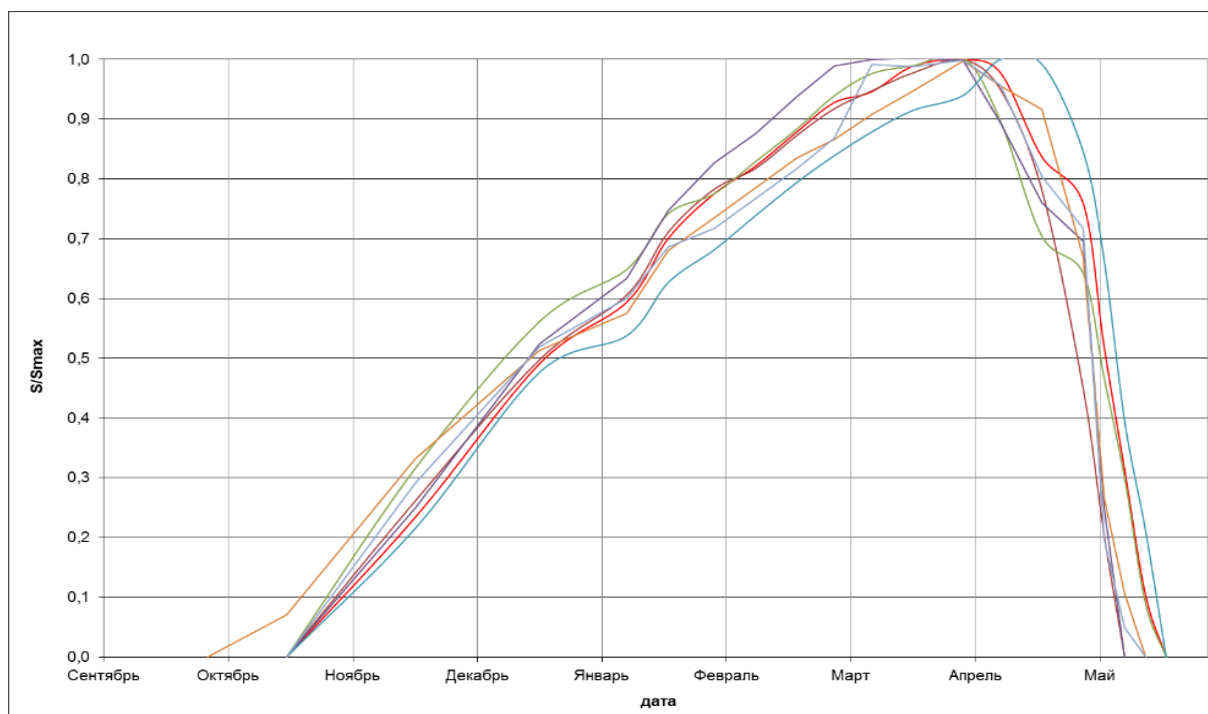


Рисунок 1.6 –Годовой ход среднееголетних характеристик максимального запаса воды в снеге (в долях от максимума) в пунктах наблюдений:

— Богучаны, — Мотыгино, — Чемдальск, — Ирба,  
— Усть-Камо, — Токма, — Бедоба

Оценка снегонакопления в бассейне водохранилища производилась по результатам космического мониторинга заснеженности [85]. Изображения площади снегового покрытия в период снеготаяния за период с 2005 по 2021 годы, отобранные для случаев с облачностью, не превышающей 30 % (Приложение В таблица В.1), послужили основой для оценки динамики площади снегового покрытия по высотным зонам бассейна водохранилища. На рисунке 1.7 приведены два варианта развития весеннего снеготаяния: 2006 год – многоснежный с поздней весной и 2011 год – малоснежный с ранней весной.

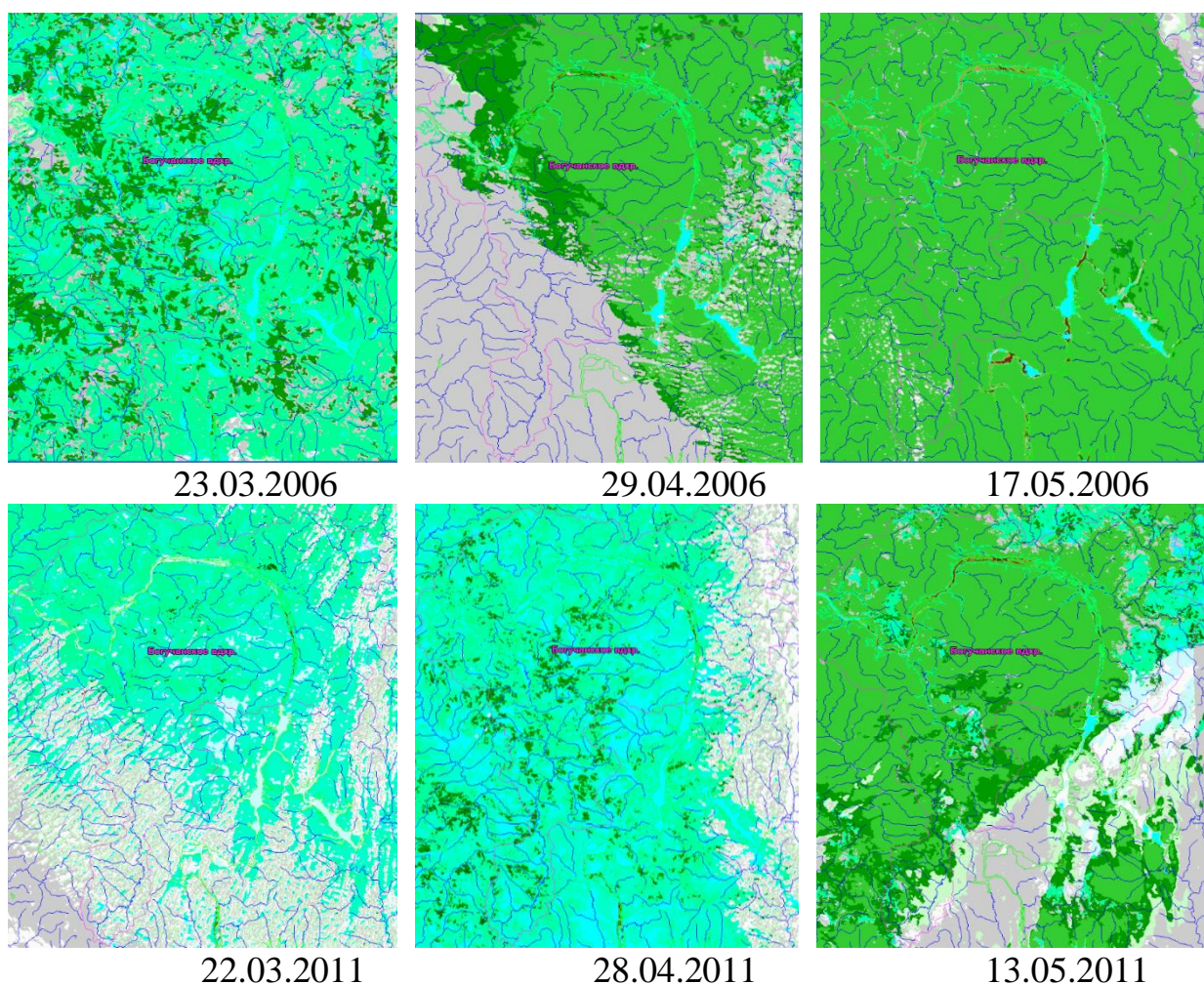


Рисунок 1.7 – Снеговое покрытие в бассейне Богучанского водохранилища за период снеготаяния в 2011 и 2006 годы (данные информационного сайта Службы мониторинга заснеженности, разработанного В. Ю. Ромасько) [85].

В малоснежный 2011 год снеготаяние завершилось 29 апреля, в то время как в многоснежный 2006 год на эту дату снег покрывал практически весь бассейн.

Многолетняя динамика наблюдаемой заснеженности Богучанского водохранилища за рассматриваемый период наблюдений отображена на рисунке 1.8. На представленном рисунке представлены кривые за период с 2007 по 2017 гг. и частично 2018 год до середины марта. Кратковременные колебания в несколько суток могут быть обусловлены выпадением твёрдых осадков, либо ошибками классификации облачности.

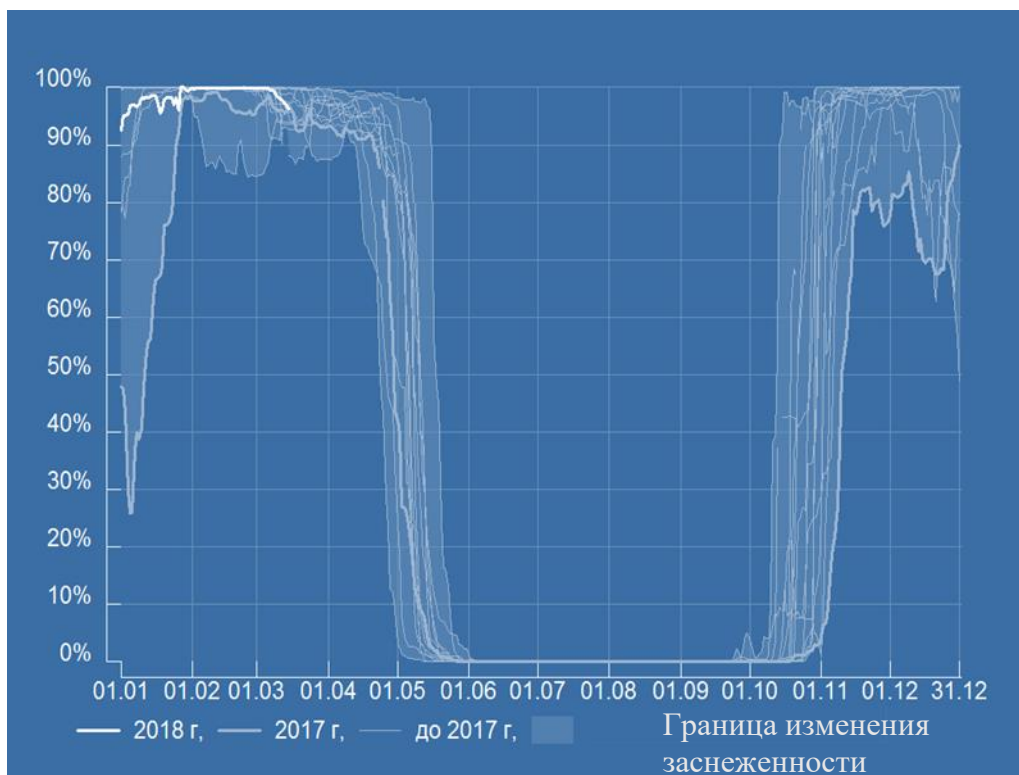


Рисунок 1.8 – График хода заснеженности бассейна Богучанского водохранилища в период 2006–2018 гг.

Летний период представляет собой годовой минимум заснеженности. Начало весны в бассейне Богучанского водохранилища в среднем наступает в середине апреля. Обычно снеготаяние заканчивается в середине мая. Общий период начала снеготаяния варьируются в пределах 3–4 недель. Продолжительность снеготаяния сравнительно невелика – 90% накопленного снежного покрова сходит быстрее, чем за неделю. Так что характер падения кривой заснеженности за рассматриваемые годы достаточно крутой.

Чтобы оценить синхронность снеготаяния в рассматриваемом регионе, рассчитаем корреляционные функции средней за весенний период температуры воздуха на метеостанциях (1) и максимальных запасов воды в снеге (2) на лесных снегомерных участках, тяготеющих к бассейну Богучанского водохранилища. Результаты расчетов приведены на рисунке 1.9.

Высокие значения парной корреляции (0,70–0,80) для запасов воды обнаруживаются на значительных расстояниях между пунктами снегомерных съе-

мок (200–300 и более км). Еще более высокая степень синхронности проявляется для средних температур воздуха за апрель-май. Эти результаты показывают, что гидрометеорологические условия в бассейне Нижней Ангары достаточно однородны.

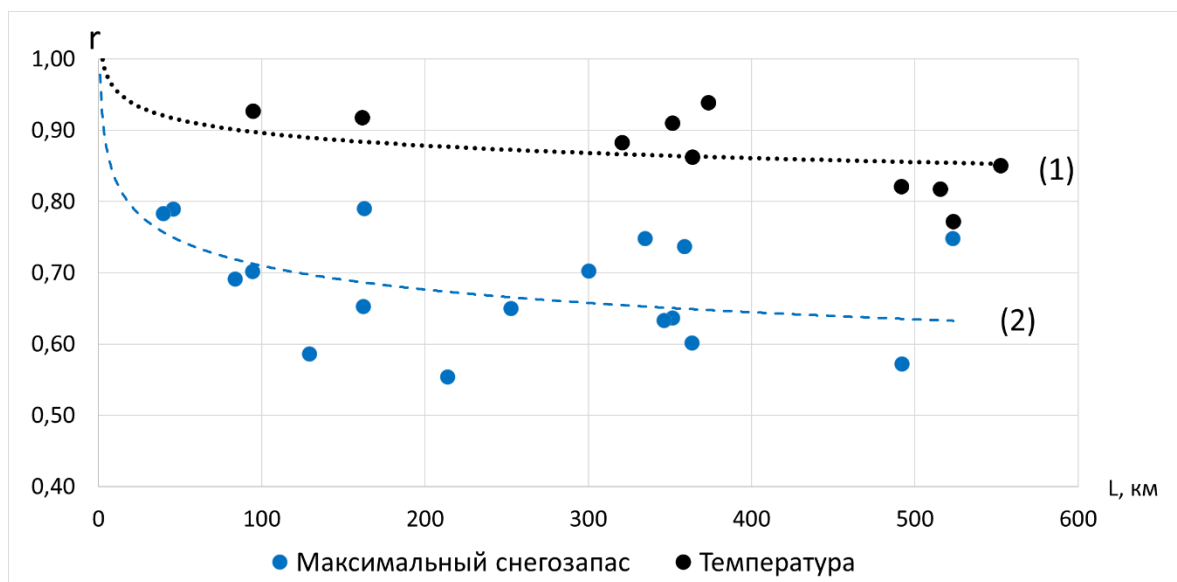


Рисунок 1.9 – Корреляционные функции: (1 - температура воздуха за период снеготаяния; 2 - максимальный запас воды в снеге)

### 1.5 Условия формирования стока в бассейне водохранилища

Гидрографическая сеть рассматриваемого района сформировалась в древние геологические эпохи, о чем свидетельствуют достаточно хорошо разработанные речные долины, наличие террас и глубокий врез речного русла.

Водный режим Ангары на описываемом участке определяется регулирующим влиянием оз. Байкал и ниже расположенных гидроузлов (Иркутского (и озеро Байкал), Братского, Усть-Илимского), работа которых регламентируются «Правилами технической эксплуатации и благоустройства водохранилищ Ангарского каскада ГЭС» [72]. Среднегодовой сброс Усть-Илимской ГЭС и Богучанской ГЭС за период нормальной эксплуатации с 2016 по 2021 г. составляет около 3000 м<sup>3</sup>/с, меняясь в течение года в основном от 2000 до 3500 м<sup>3</sup>/с, иногда достигая 5000 м<sup>3</sup>/с.

До зарегулирования за период с 1931 по 1970 гг. естественный режим стока Ангары значительно менялся. У с. Богучаны в этот период наблюдались пять выдающихся весенних подъемов с максимальным расходом воды более 10000 м<sup>3</sup>/с. Наибольший расход воды (около 13000 м<sup>3</sup>/с) наблюдался в 1952 году. После зарегулирования стока р. Ангары водохранилищами подобных повышений водности на рассматриваемом участке не отмечалось.

В пределах площади водохранилища в Ангару впадают наиболее крупные притоки: Тушама, Едорма, Ката, Кова, Кода. Бассейны основных притоков представлены на рисунке 1.10. Площадь бассейна р. Кова составляет 10700 км<sup>2</sup>, в бассейне водохранилища это самый крупный приток р. Ангара (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Малые реки в бассейне Богучанского водохранилища

№	Реки	Расстояние от устья, (км)	Длина водотока, (км)	Средняя высота водосбора (км)	Водосборная площадь (км <sup>2</sup> )	Весеннее–летний модуль стока (л/с * км <sup>2</sup> )
1	Тушама	773	224	340	3400	9,6
2	Едарма	720	153	320	2380	9,6
3	Ката	722	233	380	7970	16,6
4	Кова	526	452	420	11700	12,3
5	Кода	449	283	360	3890	14,3

Притоки Ангары на участке между Богучанской и Усть-Илимской ГЭС имеют режим с резко выраженным весенним половодьем и характеризуются преимущественно снеговым типом питания. В распределении типов питания наибольшая доля приходится на снеговую составляющую – 70-75 %. Грунтовое питание составляет 10-15 %, а на дождевое питание остается всего 5-10 % от общего стока. Средние даты начала половодья на притоках приходятся на первую декаду мая.

Дождевые паводки на малых реках нижней части бассейна Ангары невысокие. В отдельные годы они совсем отсутствуют, а выпадающие в летний период жидкие осадки расходуются на испарение и пополнение запасов грунтовых вод. Наивысшие модули дождевых паводков изменяются от 10-20

л/(сек\*км<sup>2</sup>) на большей части территории до 40-80 л/(сек\*км<sup>2</sup>) на северо-западе района. [71].

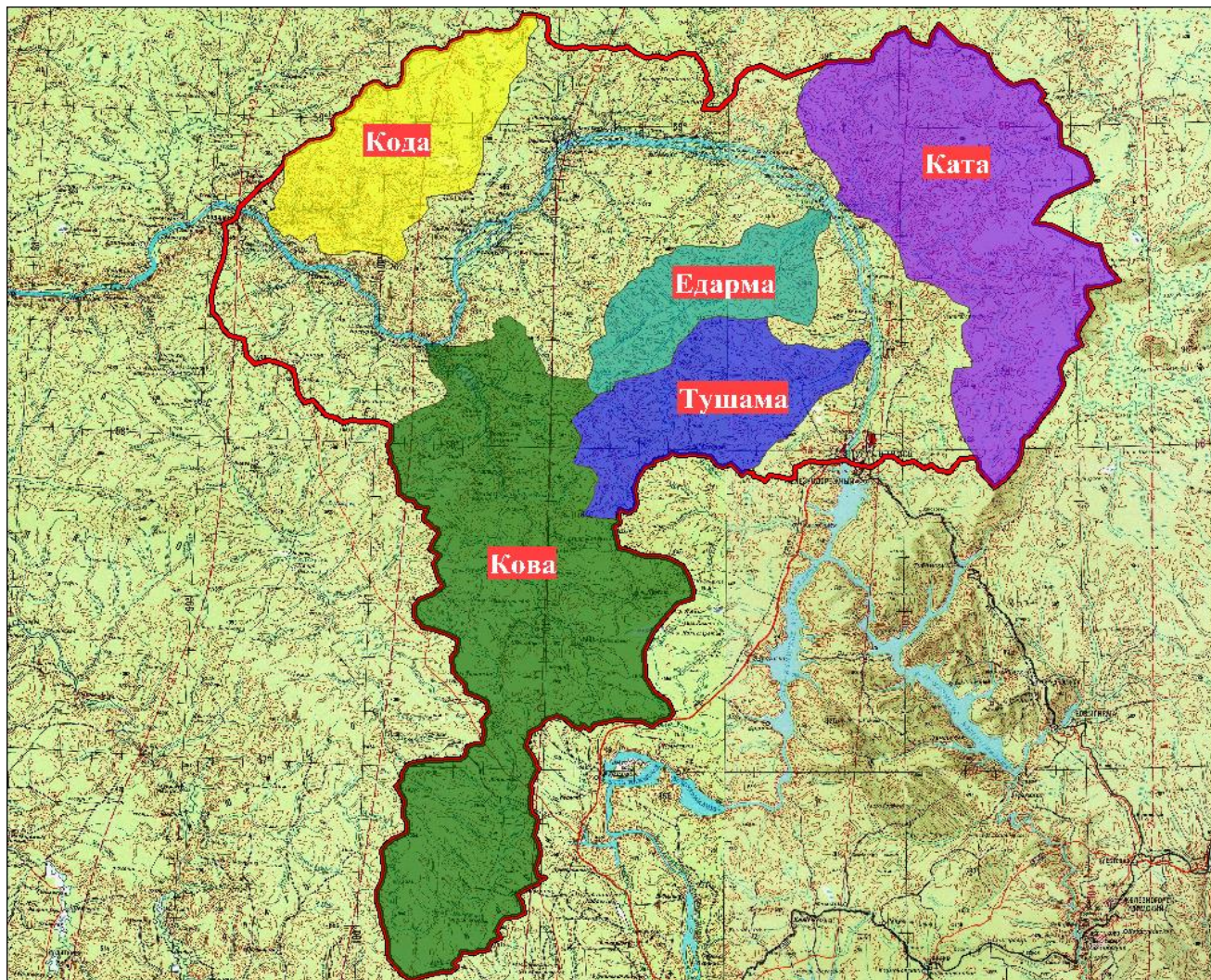


Рисунок 1.10 – Основные бассейны малых рек Богучанского водохранилища

Вскрытие притоков, впадающих между Богучанской и Усть-Илимской ГЭС, происходит почти одновременно в конце апреля - начале мая, ледоход длится 10–15 дней и сопровождается заторами льда. Толщина льда за зиму в среднем составляет 70–90 см, наибольшая 100–115 см. За время половодья, проходящего в виде одной-двух, реже трех волн, по рекам проходит более половины общего объема годового стока. Максимум половодья обычно наступает в середине мая.

Среднеголетний расход боковой приточности (согласно расчетам) составляет 440 м<sup>3</sup>/с, в период половодья в мае-июне расходы воды достигают 2900

м<sup>3</sup>/с, а в конце зимней межени снижаются до 10 м<sup>3</sup>/с. В целом, около 15 % от среднего объема годового стока Ангары в створе Богучанской ГЭС приходится на боковую приточность. Продолжительность половодья составляет в среднем 40–60 дней. В первой-второй декаде июня половодье обычно завершается. В летне-осенний период отмечаются дождевые паводки, однако они, как правило, в несколько раз меньше максимальных расходов весеннего половодья. Замерзают реки в конце октября - в начале ноября, продолжительность ледостава составляет 150–170 дней.

### 1.6. Физико-географическая характеристика бассейнов рек-аналогов

В связи с тем, что гидрометрические наблюдения на притоках, впадающих в водохранилище, после 1988 года не производятся, для расчета бокового притока использовались данные наблюдений за стоком рек-аналогов, бассейны которых лежат вне площади водосбора Богучанского водохранилища.

На рисунке 1.11 показаны бассейны рек (Чадобец, Мура, Непа), расположенные на небольшом удалении от ареала бассейна водохранилища, на которых в настоящее время производятся гидрометрические наблюдения. Данные наблюдений по этим бассейнам послужили основой для расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС [61].



Рисунок 1.11 - Схема расположения рек – аналогов  
Примечание – бассейны рек: 1 – Мура; 2 – Чадобец; 3 – Непа.



В таблице 1.7. и следующим за ней текстом представлены некоторые сведения о бассейнах рек - аналогов и ведущихся на них наблюдениях.

Таблица 1.7 – Отдельные характеристики бассейнов рек Мура, Чадобец и Непа

Река - створ наблюдений за расходом (период наблюдений)	Площадь водосбора, замыкаемого створом	Площадь покрытых лесом участков		Средняя высота водосбора	Площадь открытых участков	
	км <sup>2</sup>	км <sup>2</sup>	%		м	км <sup>2</sup>
р. Мура – с. Ирба (1962–2021 гг.)	9320	7922	85	320	1398	15
р. Чадобец – с. Яр-кино (1933–2021 гг.)	13300	12635	95	390	665	5
р. Непа – д. Ика (1955–2021 гг.)	15000	14400	96	506	600	4

*Река Мура*, левый приток р. Ангары, берет свое начало в пределах Бирюсинского плато. Восточная часть бассейна имеет общую водораздельную линию с бассейном Богучанского водохранилища. Высота у истоков реки составляет около 480 м, в районе устья – 130 м. Средняя высота водосбора 320 м. В среднем и нижнем течении располагается Мурская низина, граничащая с бассейном Ковы. В бассейне реки Мура 85% площади занимают массивы темнохвойной тайги. Почвы в бассейне в основном дерново-подзолистые. Механический состав разнообразен. В верхнем и среднем течении, до впадения р. Чудоба (правый приток р. Муры), распространены песчаные и легкосуглинистые почвы, ниже по течению они сменяются хрящеватыми. Растительность представлена преимущественно сосновыми средне и южнотаежными лесами. Безлесные участки составляют 15%, они встречаются в районе с. Ирба и у устья реки Чудоба.

*Река Чадобец*, правый приток р. Ангары, площадь бассейна 13 700 км<sup>2</sup>. Берет начало в восточных склонах Тунгусского хребта близ истоков р. Подкаменной Тунгуски. В районе истока высоты составляют около 600 м, в устье 140 м, средняя высота водосбора 390 м. Юго–восточная граница бассейна имеет общий водораздел с бассейном Богучанского водохранилища. Высоты на этом

участке составляют 350–550 м. Почвы в бассейне в основном дерново–подзолистые, в верхнем течении преобладают мерзлотно–таежные. Механический состав представлен хрящеватыми (щебнистыми) почвами, залегающими на древних аллювиально–делювиальных отложениях. Основным типом растительности являются темнохвойные леса, которые занимают около 95% бассейна.

*Река Непа* – левый приток Нижней Тунгуски. Протекает на Среднесибирском плоскогорье, по территории Катангского района. Берёт начало в пределах Ангарского кряжа, течёт в глубокой долине. Питание преимущественно снеговое. Замерзает в октябре, вскрывается во 2-й половине мая. Длина — 683 км, площадь водосборного бассейна — 19 100 км<sup>2</sup>. Впадает в р. Нижнюю Тунгуску в 2477 км от её устья. В районе истока высота водосбора составляет около 600 м, в устье 400 м, средняя высота 490 м. Почвы в бассейне горно-мерзлотно-таежные. Основной тип растительности - лиственничные леса с примесью ели и кедра, которые занимают основную часть бассейна.

Для расчета средних запасов воды в снеге ( $S$ ) и осадков за время снеготаяния ( $x$ ) в бассейнах рр. Мура, Чадобец, Непа использованы данные ближайших метеорологических станций (таблица 1.8; рисунок 1.5). Средний для бассейнов рек запас воды в снеге ( $S$ ) рассчитывался по данным стандартных снегомерных съемок. Осадки за период снеготаяния ( $x$ ) получены как среднее арифметическое в пунктах, тяготеющих к рассматриваемому бассейну.

Таблица 1.8. – Пункты сбора используемой гидрометеорологической информации в бассейнах рек - аналогов

Характеристики	Речные бассейны		
	р. Мура	р. Чадобец	р. Непа
	Пункты наблюдений		
Расходы воды	с. Ирба	с. Яркино	с. Ика
Метеорологическая информация	с. Ирба с. Мотыгино п. Абан с. Богучаны	с. Яркино п. Усть-Камо с. Богучаны	п. Чемдальск с. Токма

В таблице 1.9 приведены некоторые статистические параметры, характеризующие сроки схода снега, запас воды в снеге и суммы осадков за время снеготаяния в бассейнах рассматриваемых рек-аналогов.

Таблица 1.9 – Характеристики бассейнов рек - аналогов в период снеготаяния

Параметр бассейна	Среднее значение	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Бассейн р. Мура			
Запасы воды в снеге (мм)	113	167	80
Осадки в период снеготаяния (мм)	41,8	81,5	8,9
Дата схода снега	13 мая	31 мая	23 апреля
Бассейн р. Чадобец			
Запасы воды в снеге (мм)	195	288	129
Осадки в период снеготаяния (мм)	53,1	119	19,9
Дата схода снега	16 мая	5 июня	25 апреля
Бассейн р. Непа			
Запасы воды в снеге (мм)	150	232	116
Осадки в период снеготаяния (мм)	41,2	102	8,1
Дата схода снега	13 мая	1 июня	22 апреля

Наименьшие запасы воды наблюдаются на юге исследуемой территории (бассейн реки Мура), а наибольшие – на севере (бассейны р. Чадобец и р. Непа)

Рассмотрим вклад различных типов питания стока рек – аналогов в период весеннего половодья. Для пояснения этой задачи запишем соотношение компонентов водного баланса речного бассейна за этот период [3]:

$$W_2 = W_1 + (S + X) - (P_1 + Z_1 + Z_2 + J_1 + J_2) - Y, \quad (1.1)$$

в котором:  $W_1$ ,  $W_2$  – запасы воды в бассейне в начале и в конце снеготаяния;  $X$  – жидкие осадки, выпадающие за время снеготаяния;  $S$  – снегозапас с учетом ледяной корки на поверхности почвы;  $P_1$  – объем воды, задержанной на поверхности;  $Z_1, J_1$  – испарение снежного покрова и инфильтрация во время снеготаяния;  $Z_2, J_2$  – то же, за период от конца снеготаяния до окончания половодья;  $Y$  – сток весеннего половодья.

Преобладающим источником питания является вода, которая образуется в процессе снеготаяния ( $S+X$ ). Осадки ( $X$ ) обычно в несколько раз меньше снегозапасов. В бассейне Богучанского водохранилища и в бассейнах рек – аналогов осадки практически не оказывают влияние на форму гидрографа.

Для определения доли различных типов питания осуществлялось генетическое расчленение гидрографов стока весеннего половодья, при котором учитывались взаимные связи хода гидрометеорологических характеристик (расходы воды, осадки, температура воздуха). Дождевой сток на спаде определялся с помощью расчленения гидрографа с применением типовой кривой спада (рисунок 1.12) [13]. Следует отметить, что на рисунке представлены годы с ярко выраженной составляющей дождевого стока, но в большинстве лет дождевой сток трудно отделим от снеговой составляющей из-за отсутствия видимых колебаний гидрографа.

Обобщенные результаты исследования вклада различных типов питания и оценки компонент водного баланса рек-аналогов за период весеннего половодья представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Средние многолетние характеристики водного баланса и другие параметры бассейнов рек - аналогов в период весеннего половодья

Половодье		Характеристики водного баланса, мм								
Начало	Конец	$S$	$x$	$S+x$	Сток весеннего половодья				Потери талого стока $P=[(S+x)-y]$	Коэффициент потерь талого стока $\alpha_p = \frac{P}{S+x}$
					$Y$	$Y_d$	$Y_n$	$Y_0$		
р. Чадобец – Яркино, площадь водосбора= 13300 км <sup>2</sup> , лесистость 95 %										
1.05	14.06	195	53,1	248	83	23	13	119	165	0,66
р. Мура – Ирба, площадь водосбора= 9320 км <sup>2</sup> , лесистость 85 %										
27.04	8.06	113	41,8	154	41,9	14	9	64	112	0,73
р. Непа – Ика, площадь водосбора= 15000 км <sup>2</sup> , лесистость 95 %										
4.05	12.06	150	41,2	191	75	19	9	103	116	0,61

Обозначения компонент стока:  $Y$  – сток талых вод;  $Y_d$  – дождевой сток;  $Y_n$  – подземный сток,  $Y_0$  – суммарный сток

Из графиков на рисунке 1.12 видно, что сток талых вод формирует основную часть годового стока. Половодье обычно проходит плавной одномодальной волной, однако в отдельные годы на спаде наблюдаются небольшие подъемы за счет выпадения дождей. Для приближенного определения подземного питания производилась «срезка» гидрографа по величине расхода воды, предшествующего подъему половодья, подземное питание на гидрографе выделялась «по прямой» [20].

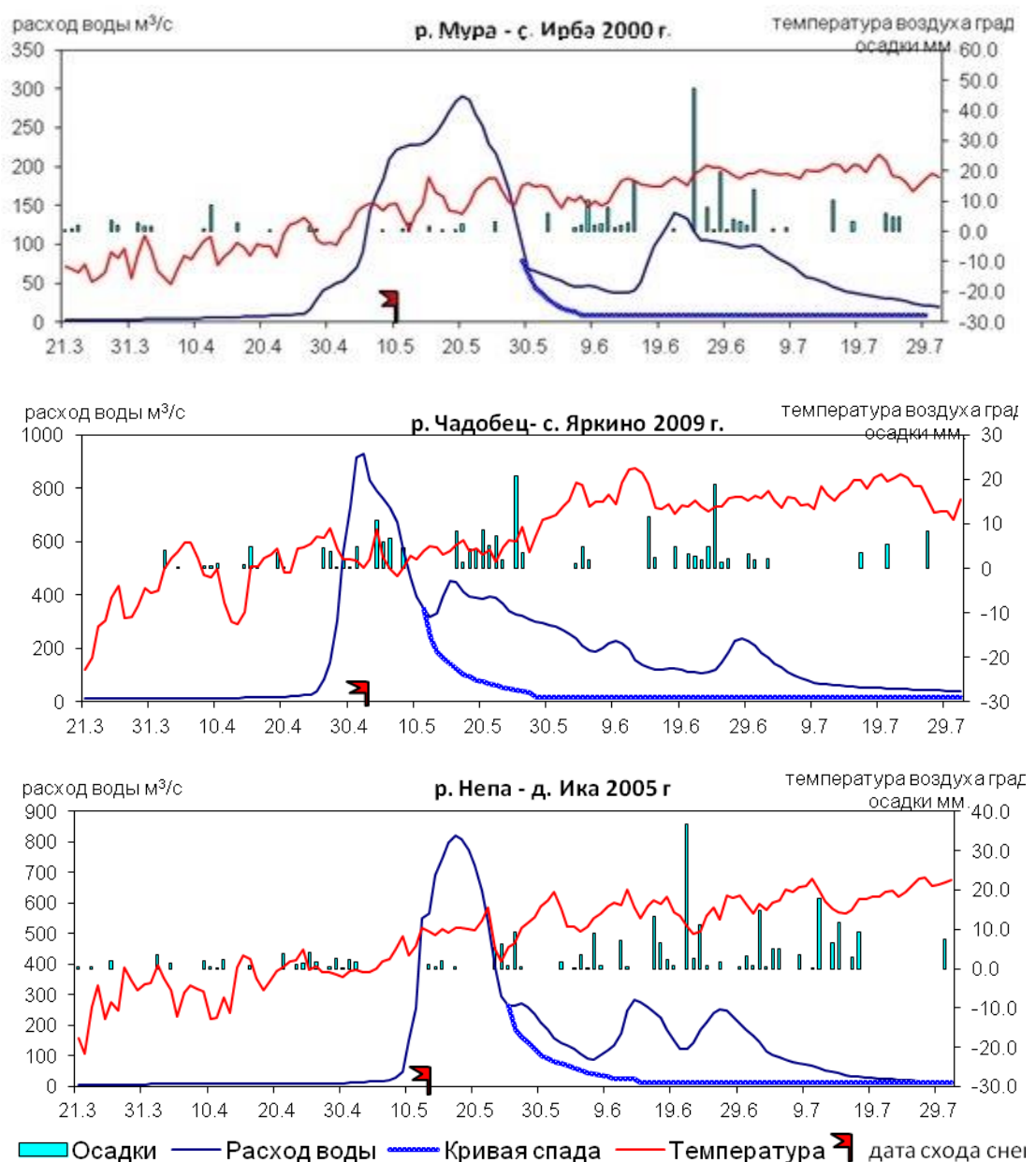


Рисунок 1.12 – Примеры временной динамики гидрометеорологических характеристик в бассейнах рек - аналогов

Наибольшей величиной стока весеннего половодья отличается река Чадобец – с. Яркино (119 мм). Бассейн р. Мура у с. Ирба включает помимо лесных территорий долю более засушливых степных ландшафтов (15%). Вследствие чего среднемноголетний слой стока этого бассейна меньше чем в других бассейнах и составляет 64 мм. Река Непа (приток Нижняя Тунгуски) протекает в горно–таежном районе, ее средний многолетний сток составляет 103 мм. Коэффициент потерь  $\alpha_p = \frac{P}{S+x}$  для сравниваемых бассейнов составляет 0,61, 0,66 и 0,73. Он наибольший для реки Муры, и уменьшается для Непы и Чадобца. В распределении типов питания рек наибольшая доля приходится на снеговую составляющую – 64-73 %, на грунтовую - 9-14 %, на дождевую - 18-22 %. Дата схода снега устанавливается либо по данным снегомерных съемок, если они фиксируют площадь снегового покрытия менее 50%, либо расчетным путем.

На практике широко используется методика расчета снеготаяния по данным о температуре воздуха, предложенная М. А. Великановым [35]. На ее основе слой стаивания снега ( $h$ , мм за сутки) определяется по соотношению:

$$h = k (+t), \quad (1.2)$$

Коэффициент стаивания ( $k$ ) показывает, сколько миллиметров слоя талой воды ( $h$ ) образуется за одни сутки на  $1^\circ\text{C}$  положительной среднесуточной температуры воздуха ( $+t$ ), задаваемой в градусах Цельсия [54].

Ветер, определяющий степень турбулентного теплообмена снежной поверхности с атмосферой, оказывает существенное влияние на изменчивость коэффициента стаивания. На открытых участках наблюдается увеличение скорости ветра по сравнению с лесом. Еще одним условием изменчивости коэффициента стаивания является величина облачности. Эти факторы оказывают влияние на изменение структуры и интенсивности тепловых потоков к поверхности снежного покрова.

П.П. Кузьмин [54] установил соотношение интенсивности снеготаяния в поле и в лесу в зависимости от таксационных характеристик леса. Согласно его рекомендациям, средние значения коэффициента стаивания снега в поле составляет  $5,0 \text{ мм}/(^\circ\text{C}\cdot\text{сутки})$ . Коэффициент стаивания в лесу зависит от типа и

полноты леса, изменяясь в пределах 1,5–3,2 мм/(°С\*сутки). Для бассейна Нижней и Средней Ангары в хвойных и густых смешенных лесах коэффициент стаивания изменяется от 1,5 до 2,5, в среднем составляя 2,0 мм/(°С\*сутки).

Дата начала половодья также зависит как от температуры воздуха, так и от других факторов. Приближенная связь дат начала половодья и перехода средней суточной температуры воздуха через 0°С для исследуемого района представлена на рисунке 1.13.

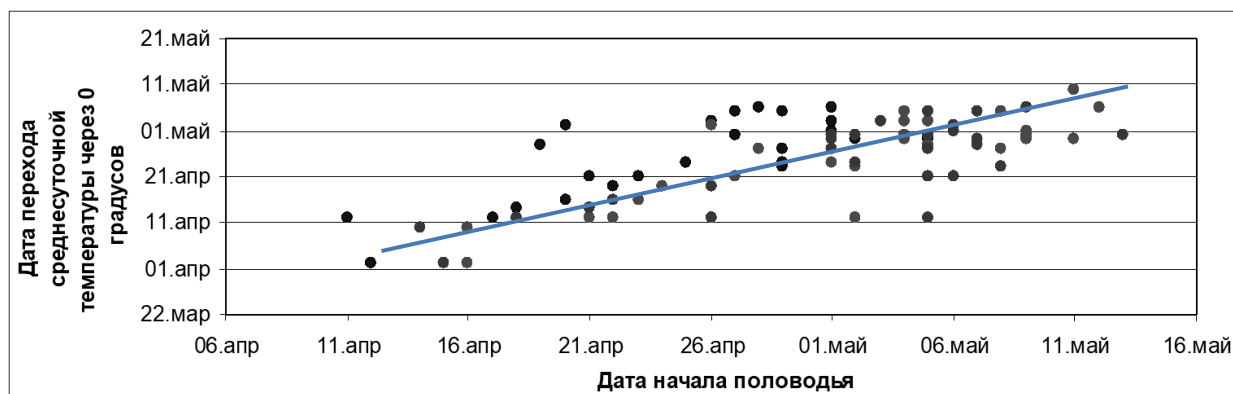


Рисунок 1.13 – Связь даты начала половодья и даты перехода средней за сутки температуры через 0° для бассейнов рек Мура, Чадобец, Непа

В бассейне нижней и Средней Ангары период снеготаяния завершается в середине мая. Весенняя погода характеризуется как возвратами холодов, так и интенсивным прогревом. Даты начала и конца половодья определяется не только сроками весеннего потепления. Они зависят и от интенсивности потепления, и от возможных возвратов холодов, от величины запаса воды в снеге и степени увлажнения почво-грунтов. В таблице 1.11 приведены отдельные характеристики половодья на реках- аналогах. Половодье на р. Мура наступает несколько раньше, чем на остальных рассматриваемых реках. Оказывает влияние более южное расположение бассейна этой реки и особенности его рельефа (Мурская низина).

Таблица 1.11 – Сроки прохождения половодья и его максимальные наблюдавшиеся расходы на реках Мура, Чадобец и Непа

Характеристика половодья	Среднее значение	Наименьшее значение	Наибольшее значение
р. Мура – с. Ирба			
Дата начала/ конца половодья	27.04 / 8.06	12.04.1997 / 17.05.2011	6.05.1992 / 23.06.1983
Максимальный расход воды (м <sup>3</sup> /с)	230	50 (1993 г.)	510 (1999 г.)
р. Чадобец – с. Яркино			
Дата начала/ конца половодья	1.05/ 14.06	15.04.1997 / 27.05.2011	13.05.1999 / 02.07.1983
Максимальный расход воды (м <sup>3</sup> /с)	1010	320 (1993 г.)	1950 (2004 г.)
р. Непа – д. Ика			
Дата начала/ конца половодья	4.05/ 12.06	16.04.1997/ 21.05.1997	14.05.1983/ 27.06.1980
Максимальный расход воды (м <sup>3</sup> /с)	884	1540 (1983 г.)	238 (1993 г.)



## ГЛАВА 2. РАСЧЕТ СУТОЧНОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

### 2.1 Обзор существующих предложений по расчетам ежедневного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС

Строительство Богучанской ГЭС началось в 1978 г. В период распада СССР строительство было приостановлено. Оно возобновилось в 2007 году. Ввод ГЭС в эксплуатацию происходил с 2012 по 2015 годы. В начальный период строительства Богучанской ГЭС (1982–1988 гг.), в Красноярском УГМС и в Гидрометцентре СССР были предложены варианты методик расчета бокового притока в Богучанское водохранилище. Ниже кратко рассмотрим существующие предложения по расчетам ежедневного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.

*Методика Е.А. Шатуновой (1982 г).* Для расчета ежедневного бокового притока использовался гидрометрический метод. С учетом гидрографии бассейна Богучанского водохранилища и существующей в то время сети пунктов наблюдений бассейн был разделен на районы и определены реки-аналоги. Во время создания методики в рассматриваемом бассейне бокового притока действовало 10 водомерных постов, освещающих большую его часть. В настоящее время на всех реках-аналогах, используемых в модели Е.А. Шатуновой, наблюдения прекращены. [87]

*Методика А.И. Афанасьева (1985 г).* Расчет бокового притока выполнен по разнице между притоком на участках Невон – Богучаны, и Сыромолотово – Богучаны. Среднемесячные и среднегодовые расходы бокового притока на р. Ангаре между Усть-Илимской и Богучанской ГЭС за 1903/04 – 1979/80 гг были получены перерасчетом боковой приточности участка Невон – Богучаны на участки, где не было измерений. Значения расходов воды малых рек пересчитывались в модули стока, и их значения распространялись на площадь, не освещенную наблюдениями. Оценки неизвестных составляющих бокового притока вычислялись пропорционально соотношениям площадей водосборов, с учетом известных модулей стока основных притоков на соответствующих участках [6].

Методика В.А. Жорова (1988 г). В этой методике для расчета притока используются методы водного баланса и гидрологической аналогии. С этой целью:

1. Составляется уравнение водного баланса водохранилища.
2. Слабоизученные или трудноопределимые компоненты баланса оцениваются с использованием концептуальных математических моделей.
3. Параметры моделей определяются путем решения задачи минимизации средней квадратичной величины невязки балансов, вычисленных за достаточно длительный период, с использованием процедур оптимизации моделей.

Методика В.А. Жорова рассмотрена в [41]. Представляет интерес его подход к оценке аккумуляции воды в емкостях подземного бассейна и устьевых зонах притоков, детальный расчет добегания расходов основного и бокового притока от гидрометрических створов до водохранилища, а также учет притока от таяния льда, оседающего на берегах водохранилищ при сработке уровня воды.

## 2.2 Оценка бокового притока методом водного баланса

Обстоятельные исследования методологии и точности расчета бокового притока в водохранилища методом водного баланса выполнены Р.А. Нежиковским [62], следуя которому уравнение баланса записывается в следующем виде

$$(Q_{нов} + X + I_{нпр}) - (Z_{в} + Q_{сб} + Q_{ф} + I_{ном}) = \Delta W_{в} + N. \quad (2.1)$$

В этом уравнении сумма составляющих в первой скобке представляет объем воды, поступающей в водохранилище ( $Q_{нов}$  – поверхностный приток,  $X$  – осадки на поверхность водоема,  $I_{нпр}$  – подземный приток воды в водохранилище). Сумма во второй скобке содержит объем воды, уходящей из водохранилища ( $Z_{в}$  – испарение с водной поверхности,  $Q_{сб}$  – сбросы через плотину,  $Q_{ф}$  – фильтрация воды через плотину,  $I_{ном}$  – подземный отток воды из водохранилища). Сумма составляющих в правой части уравнения равна изменению объема воды в водохранилище  $\Delta W_{в}$  (аккумуляция или сработка) и «невязке» баланса  $N$ , суммарно учитывающей ошибки определения всех перечисленных элементов баланса.

Уравнение водного баланса (2.1) может быть использовано для расчета притока воды в озера и водохранилища. В представленной редакции этого уравнения в «невязку баланса»  $N$  входят такие составляющие как забор воды на хозяйственные нужды, аккумуляция во льду, аккумуляция в устьевых зонах притоков и другие незначительные компоненты. При существенной роли перечисленных составляющих их следует учитывать при водно-балансовых расчетах.

Под поверхностным притоком в водохранилище  $Q_{нов}$  понимается сумма основного притока (сток одной или нескольких крупных рек, впадающих в водохранилище) и бокового притока (поступающего с частного бассейна определяемого гидрометрическими створами на основных реках и плотиной ГЭС). Для Богучанского водохранилища поверхностный приток в водохранилище  $Q_{нов}$  представляет сумму основного притока (сбросные расходы Усть-Илимской ГЭС  $Q_{УИГЭС}$ ) и бокового притока  $Q_{бок}$ , поступающего с частного бассейна между Усть-Илимской и Богучанской ГЭС:

$$Q_{нов} = Q_{УИГЭС} + Q_{бок}. \quad (2.2)$$

Расход  $Q_{УИГЭС}$  измеряется непосредственно в створе плотины Усть-Илимской ГЭС. Соответственно, для сбрасываемого в нижнем створе расхода можно положить  $Q_{сб} = Q_{БогГЭС}$ . Поэтому, если могут быть оценены и другие члены уравнения (2.1), то оно может быть использовано для вычисления бокового притока в Богучанское водохранилище.

Изменение объема водохранилища  $\Delta W_6$  в нынешних условиях вычисляется по данным наблюдений за его уровнем только в двух водомерных пунктах, что дает весьма приближенную оценку компонента  $\Delta W_6$ .

Величина подземной аккумуляции  $\Delta W_n$ : С использованием обозначений, принятых в уравнении (2.1), она задается формулой

$$\Delta W_n = (I_{нпр} - I_{ном}). \quad (2.3)$$

Заметим, что при наличии гидравлической связи подземных вод с уровнем воды водохранилища предполагается наличие потоков грунтовых вод либо к водохранилищу, либо от него. При росте уровня воды наблюдается подземный отток воды из водохранилища, при спаде – происходит обратный процесс.

При отсутствии данных о режиме подземных вод, составляющие  $I_{npr}$  и  $I_{nom}$  непосредственно не учитываются. В этом случае «невязка» баланса будет включать переменную во времени величину подземной аккумуляции. Если амплитуда колебания уровней воды водохранилища невелика, как это имеет место для водохранилища Богучанской ГЭС после его нормативного наполнения, исключение упомянутых составляющих ( $I_{npr}$  и  $I_{nom}$ ) не даст значительной дополнительной погрешности. В период же наполнения водохранилища эта составляющая водного баланса может быть существенной.

Наполнение водохранилища осуществлялось с апреля 2012 года, а с мая 2015 г. водохранилище работает в режиме нормальной эксплуатации. Основным фактором формирования водного режима Богучанского водохранилища служит соотношение между приходными и расходными компонентами водного баланса. Приходная часть водного баланса в основном определяется расходами воды через плотину Усть-Илимской ГЭС. Главная расходная часть - это поверхностный сток через плотину Богучанской ГЭС. В среднем многолетнем разрезе разница количества осадков  $X$  и испарения  $Z_v$  невелика по сравнению с остальными составляющими баланса. Тогда, опуская упомянутые составляющие, а также  $Q_f$  и невязку баланса  $N$ , можно рассчитать приближенные осредненные по времени оценки других компонентов водного баланса Богучанского водохранилища (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Оценки компонент водного баланса Богучанского водохранилища

Временной интервал	$U_{Бог}$	$U_{Усть-Ил}$	$W_{бок.ан}$	$\Delta W_v$	$\Delta W_n$
2012-2015 (период наполнения)	2350	2780	181	669	-57
2015-2016 (период нормальной эксплуатации)	2540	2430	176,5	38	28

*Примечание* – приведенные данные выражены в единицах расхода воды

Отрицательный знак  $\Delta W_n$  (в таблице 2.1) обусловлен заполнением подземной емкости, когда подземный отток воды превышает подземный приток. В период нормальной эксплуатации водохранилища аккумуляционный член  $\Delta W_n$  может иметь как положительное значение, так отрицательное значение. По данным, приведенным в таблице 2.1 можно сказать, что подземная аккумуляция в

период нормальной эксплуатации не превышает 2% от общего стока воды. Следовательно, недоучет подземного водообмена не дает существенного вклада в невязку водного баланса.

Графики динамики уровня Богучанского водохранилища в разные периоды его существования показаны на рисунке 2.1.

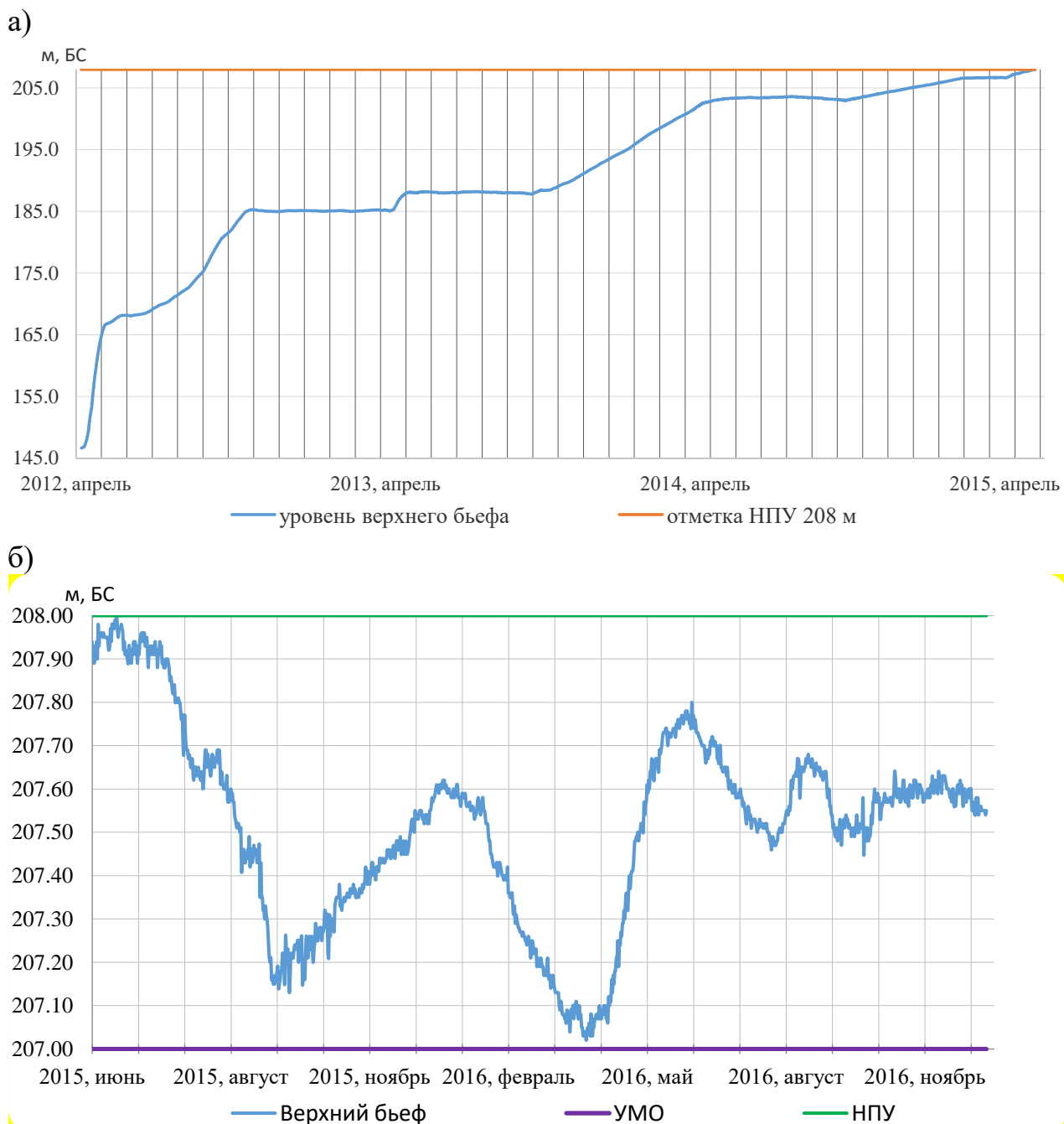


Рисунок 2.1 - Временной ход уровня воды в верхнем бьефе Богучанской ГЭС в период: (а) наполнения водохранилища; (б) нормальной эксплуатации

Принимая во внимание измеряемые компоненты водного баланса, и опуская его несущественные компоненты, запишем для расчета бокового притока в

Богучанское водохранилище в период его нормальной эксплуатации (т.е. после наполнения) следующую формулу:

$$Q_{бок} = Q_{БогЭС} - Q_{УИГЭС} + \Delta W_{\epsilon} \quad (2.4)$$

За продолжительное время (месяц, а тем более, квартал) определение бокового притока по этой формуле обеспечивает приемлемую точность [62]. Расчеты суточного бокового притока по балансовой формуле (2.4) за период половодья в 2015 и 2016 гг. показывают значительную амплитуду его случайных колебаний, вплоть до отрицательных значений, достигающих  $-1500 \text{ м}^3/\text{с}$  (рисунок 2.2), что явно нереально.

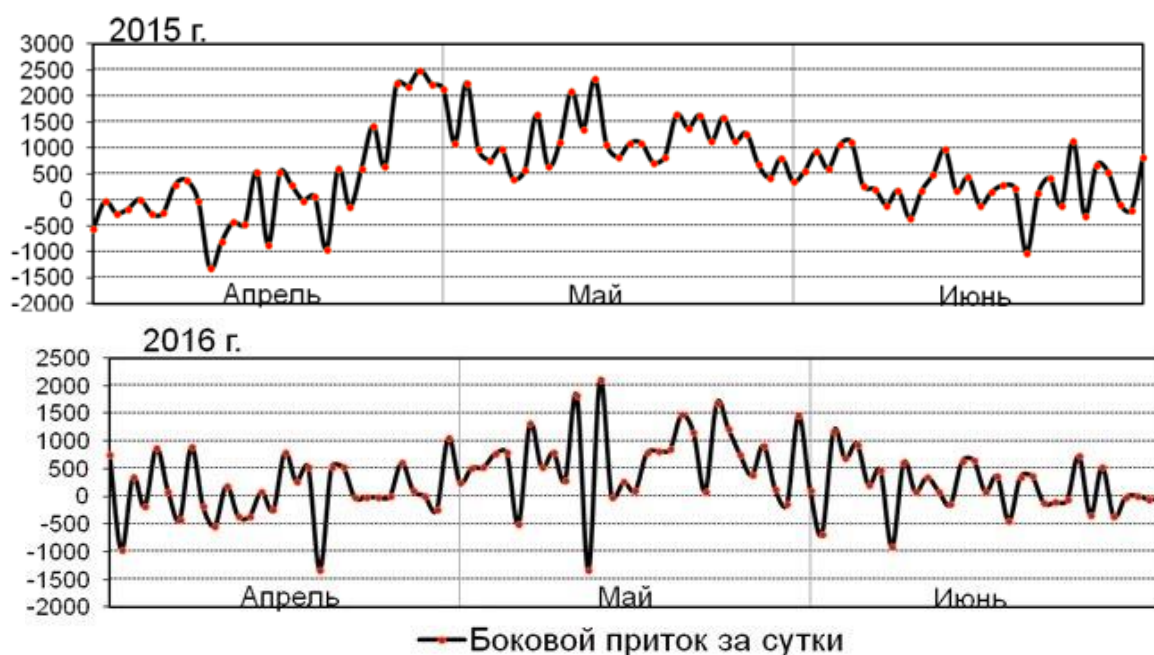


Рисунок 2.2 – График хода ежедневного бокового притока, рассчитанного балансовым способом

Точность водно-балансового метода быстро падает с уменьшением расчетного отрезка времени, за который вычислялся приток, из-за неточного учета аккумуляции воды в водохранилище по данным малого числа водомерных пунктов, и денивеляций водной поверхности (перекос поверхности уровня водоёмов, возникающий в результате стонно-нагонных явлений или сейшевых колебаний). С увеличением доли аккумуляции в водном балансе водохранилища возрастают ошибки расчета ежедневного притока. Согласно исследованиям

Р.А. Нежиховского, ошибка суточного притока может превышать таковую за месяц в несколько раз [62].

Таким образом, при существующей в настоящее время системе контроля компонент водного баланса Богучанского водохранилища, рассчитать с приемлемой точностью суточные значения бокового притока не удастся. По этой причине расчет бокового притока в водохранилище по методу водного баланса выполняется только применительно к декадным, месячным и квартальным временным интервалам.

На практике для расчета суточных величин бокового притока используется гидрометрический метод, который применяется для расчетов неизученного притока за короткие промежутки времени. В этом случае рассматриваемый метод является более предпочтительным, чем расчет притока воды по водно-балансовому методу. Ниже, рассмотрены вопросы, связанные с решением этой задачи для условий современной гидрологической изученности исследуемой территории.

### **2.3 Расчет бокового притока гидрометрическим методом**

Расчет бокового притока гидрометрическим методом заключается в его оценке по данным о стоке малых рек, впадающих в водохранилище. В настоящее время этот подход получил наибольшее распространение. Он заключается в суммировании расходов воды, полученных по данным измерений на реках-аналогах на водосборной площади бокового притока с учетом коэффициентов «стоковой приводки».

Для расчета притока с помощью гидрометрического метода требуется решить следующие задачи:

- разделить площадь водохранилища на районы с однородными физико-географическими условиями,
- выбрать реки-аналоги для каждого района,
- рассчитать боковой приток по данным о стоке выбранных рек-аналогов.

Для разделения бассейна на районы определяющими факторами являются количество выпавших осадков, рельеф и характер ландшафта. От этих факторов зависят различные характеристики речного стока, прежде всего, его территориальное распределение. Важно, чтобы колебания ежедневных расходов воды рек-аналогов были синхронны колебаниям бокового притока в соответствующих районах.

Расчет бокового притока по стоку рек-аналогов чаще всего выполняется с использованием коэффициентов «стоковой приводки», учитывающих соотношения площади района и площади водосбора аналога, что справедливо, если модули стока районов и соответствующих аналогов близки по величине. Рассмотрим расчет бокового притока гидрометрическим методом применительно к Богучанскому водохранилищу.

На первом этапе боковой приток рассчитан за период с 1977 по 1987 гг., когда проводились гидрологические наблюдения на малых реках (Тушама, Едарма, Ката и Ката). Бассейны этих рек располагаются на водосборной площади водохранилища (рисунок 2.3).

Площадь бассейна водохранилища разделена на три района, приток с которых «контролируется» стоком соответствующих малых рек, причем для второго района ( $F_2$ ) модуль стока принят равном среднему значению по рекам Тушама и Едарма. Коэффициенты стоковой приводки для выделенных районов, определялись как отношение площади районов к соответствующим площадям бассейнов-аналогов. Далее, за период с 1977 по 1987 гг. ежедневные значения бокового притока  $Q_{бок}(t)$  определены по формуле:

$$Q_{бок}(t) = \frac{Q_{Ката}}{f_1} F_1 + \left[ 0,5 \left( \frac{Q_{Едарма}}{f_2} + \frac{Q_{Тушама}}{f_3} \right) \right] F_2 + \frac{Q_{Ката}}{f_1} F_3, \quad (2.5)$$

где:  $F_1, F_2, F_3$  – площади районов;  $f_1, f_2, f_3, f_4$  – площади водосборов рек-аналогов (р. Ката - 7 км от устья, р. Едарма - д. Едарма, р. Тушама - д. Тушама, р. Ката - д. Ката), бассейны которых располагаются непосредственно на площади водосбора бокового притока Богучанского водохранилища.



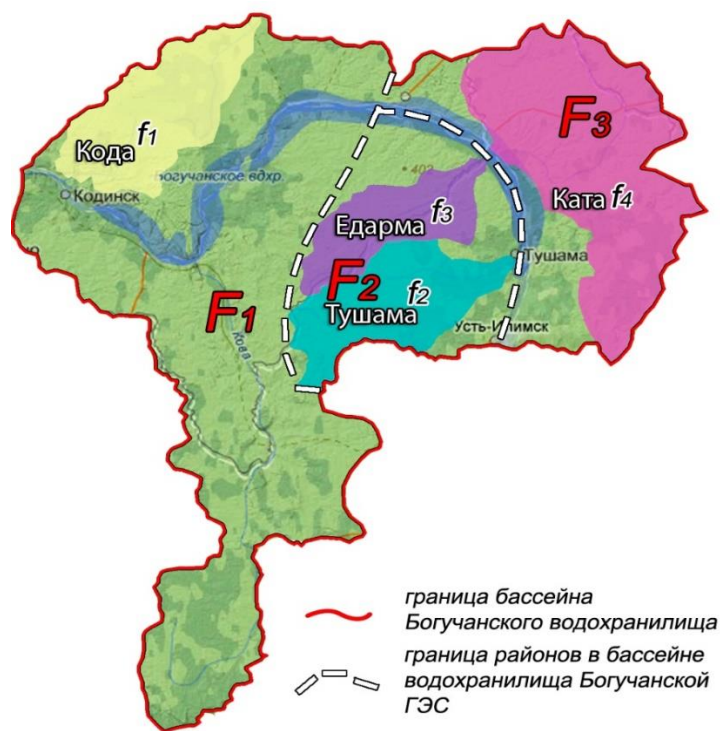


Рисунок 2.3 – Карта-схема бассейнов малых рек в Богучанском водохранилище

С середины прошлого века на сопредельных с водохранилищем территориях проводятся непрерывные гидрометрические наблюдения на реках Чадобец, Мура и Непа. Бассейны этих рек характеризуются схожими ландшафтно-гидрологическими условиями для всей площади бокового притока Богучанского водохранилища, что подтверждается наличием высокой тесноты корреляционной связи расходов на пересекающемся временном интервале наблюдений (таблица 2.2).

Таблица 2.2 Матрица коэффициентов парной корреляции стока рек-аналогов в суточном (числитель) и декадном (знаменатель) разрешении

Реки	$Q$ Кода	$Q$ Тушама	$Q$ Едарма	$Q$ Ката	$Q$ Мура	$Q$ Чадобец
$Q$ Тушама	$\frac{0,947}{0,978}$					
$Q$ Едарма	$\frac{0,923}{0,959}$	$\frac{0,944}{0,969}$				
$Q$ Ката	$\frac{0,815}{0,862}$	$\frac{0,831}{0,878}$	$\frac{0,829}{0,867}$			
$Q$ Мура	$\frac{0,843}{0,908}$	$\frac{0,876}{0,922}$	$\frac{0,775}{0,861}$	$\frac{0,772}{0,876}$		
$Q$ Чадобец	$\frac{0,887}{0,926}$	$\frac{0,897}{0,925}$	$\frac{0,916}{0,938}$	$\frac{0,889}{0,923}$	$\frac{0,825}{0,894}$	
$Q$ Непа	$\frac{0,793}{0,829}$	$\frac{0,832}{0,856}$	$\frac{0,785}{0,817}$	$\frac{0,857}{0,893}$	$\frac{0,807}{0,857}$	$\frac{0,868}{0,886}$

Из данных, приведенных в таблице 2.2, вытекает, что ежедневные и декадные расходы воды рек Мура, Чадобец, Непа отличаются высокой корреляцией ( $r > 0,8$ ) с расходами воды рек, располагающихся в бассейне водохранилища (Кода, Тушама, Едарма, Ката). Следовательно, действующие сегодня гидрологические посты на реках Мура, Чадобец и Непа, можно использовать в расчетах бокового притока. С этой целью по данным наблюдений за 1977–1987 гг. получено следующее уравнение регрессии:

$$Q_{бок}(t) = 2,34Q_M(t) + 1,52Q_q(t) + 0,317Q_n(t) + 51,8, \quad (2.6)$$

где  $Q_{бок}(t)$  – среднее за сутки значение бокового притока в Богучанское водохранилище, рассчитанное по уравнению 2.9;  $Q_M(t)$ ,  $Q_q(t)$ ,  $Q_n(t)$ , – средние за сутки расходы воды соответственно на р. Мура у с. Ирба, р. Чадобец у с. Яркино и р. Непа у д. Ика, определенные по данным непосредственных измерений..

Показатели тесноты этой связи следующие: коэффициент множественной корреляции  $R=0,97$ ;  $t$ -статистики коэффициентов регрессии равны соответственно: 15,3 (при  $Q_M(t)$ ); 30,9 (при  $Q_q(t)$ ); 6,88 (при  $Q_n(t)$ ), т.е. ошибки коэффициентов регрессии значительно меньше их значений.

#### **2.4 Сравнение оценок бокового притока в Богучанское водохранилище, полученных разными методами**

Оба рассмотренных в предыдущих параграфах метода расчета суточного бокового притока в Богучанское водохранилище содержат как случайные, так и систематические ошибки. В балансовом методе такие ошибки связаны с точностью оценивания доступных для непосредственного измерения составляющих баланса и игнорированием недоступных составляющих. В гидрометрическом методе ошибки генерируются за счет точности аппроксимации данных и необходимостью экстраполяции в пространстве или времени применяемых для расчета притока соотношений. Так или иначе, мы имеем две независимых приближенных оценки бокового притока, сравнение и совместное использование позволяет уточнить искомый результат.

Как было показано выше, расчет суточного бокового притока по формуле (2.4) в период после заполнения водохранилища содержит большую случайную ошибку, что не позволяет эффективно сравнить эти расчеты с расчетами по формуле (2.6). Однако во время проектирования и строительства Богучанской ГЭС был открыт водомерный пост у поселка Сыромолотово, расположенный в 13 км ниже плотины Богучанской ГЭС, что позволило применить элементы этого метода и к периоду до создания водохранилища. На этом временном интервале оценка бокового притока  $Q_{бок}(t)$  по данным измерений расхода в этом створе и в створе Усть-Илимской может быть получена по формуле:

$$Q_{бок}(t) = Q_n(t) - Q_в(t-\tau), \quad (2.7)$$

где  $t$  – время,  $\tau$  – сдвигка на время добегания,  $Q_n(t)$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) у плотины Богучанской ГЭС (пос. Сыромолотово);  $Q_в(t-\tau)$  – сбросы Усть-Илимской ГЭС.

В данном случае боковой приток рассчитывался по разнице между расходами в нижнем по течению створе (п. Сыромолотово) и верхнем створе (Усть-Илимская ГЭС) с учетом времени добегания. Длина рассматриваемого участка составляет 360 км, сдвигка на время добегания - трое суток.

Понятно, что до строительства плотины Богучанской ГЭС остальные компоненты водного баланса данного участка реки много меньше компонентов в правой части формулы (2.7) и ими можно обоснованно пренебречь. Кроме того, приближенный учет динамики движения воды в русле путем учета характерного времени ее добегания от верхнего створа к нижнему позволяет дополнительно уточнить оценку бокового притока.

Гидрометрическая информация с водомерного поста Сыромолотово и формула (2.7) могут быть использованы для контроля точности расчета бокового притока, выполненного гидрометрическим методом. Вычисление коэффициента парной корреляции между двумя соответствующими оценками дает его величину равную 0,95. При этих вычислениях расходы воды при подвижках льда и во время ледохода при сопоставлении не учитывались из-за снижения

точности учета стока в п. Сыромолотово при наличии ледовых явлений [6]. Таким образом, результаты данного расчета показывают высокую корреляцию бокового притока по формулам (2.7) и гидрометрическим методом (формулы 2.5 и 2.6). Такой уровень корреляции говорит о незначительной величине случайной ошибки, присутствующей в оценках притока, по сравнению с его полной изменчивостью на сравниваемом временном интервале.

Случайная высокочастотная составляющая полной суммарной ошибки может быть уменьшена сглаживанием суточных данных по времени. При рассмотрении балансового метода уже упоминалось, что декадные, месячные и квартальные оценки притока обладают большей точностью по сравнению с его суточными оценками. Такое же утверждение справедливо и для гидрометрического метода.

Систематическая ошибка не уменьшается при осреднении данных расчетов по времени, но она может быть оценена, если сравнить усредненные оценки, полученные разными методами. Если две такие усредненные по времени оценки существенно различаются, то заметная систематическая ошибка присутствует в одной, другой или обеих оценках. В этом случае по разнице усредненных оценок может быть определена характерная величина систематической ошибки, которая может быть уменьшена путем вычисления среднего по двум оценкам значения. Может быть также отдан приоритет одному из методов, который по каким-то дополнительным соображениям следует выбрать как приоритетный. В нашем случае такой приоритет был отдан гидрометрическому методу, и расчетные оценки, полученные с его использованием, далее называются «фактическими» значениями бокового притока в Богучанское водохранилище и используются при построении его прогностических моделей, описываемых в следующих главах диссертации.

### **ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА КВАРТАЛЬНОГО БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

До сих пор, несмотря на значительные успехи, достигнутые в области физико-математического описания процессов формирования стока, в практических методах гидрологических прогнозов широко используется физико-статистические модели, опирающиеся на аппроксимацию эмпирических зависимостей с использованием тех или иных формальных уравнений регрессии. Чаще всего в таких моделях используются линейные уравнения регрессии, но также применяются и нелинейные математические операторы вычисления условного среднего значения прогнозируемого параметра. Такое положение объясняется недостатком необходимой информации для калибровки физико-математических моделей. В то же время физико-статистические модели менее требовательны к составу используемой информации о возможных предикторах притока и могут строиться на основе реально имеющихся данных. Конечно, такие данные должны подбираться не совсем произвольно, а с учетом некоторых известных физических и географических закономерностей формирования стока.

В отделах гидрологических прогнозов территориальных УГМС разработаны многочисленные эмпирические зависимости, на основе которых предсказываются объем стока и максимальный уровень воды весеннего половодья в зависимости от поступления воды на водосбор и показателей водопроницаемости почв. Ниже рассмотрим несколько эмпирических моделей, предназначенных для прогноза квартального бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС в период половодья.

#### **3.1 Выбор предикторов и прогноз бокового притока по линейной регрессионной модели его зависимости от метеорологических факторов (способ 1)**

В разработанной автором базе данных Росгидромета, характеризующих условия формирования бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС,

насчитывается более 100 переменных, которые могут выступать в качестве его предикторов. Из общих физико-географических соображений в эту базу были включены данные о значениях следующих группы характеристик, отражающих основные факторы формирования притока:

- запасы воды в снежном покрове по данным снегомерных съемок в пунктах наблюдений;
- показатели осеннего увлажнения почвы;
- температура почвы на глубине 0,2 м за осенне-зимний период;
- средние месячные расходы воды;
- средние по месяцам и декадам температуры воздуха;
- суммы осадков по месяцам и декадам.

Далее по тексту значения этих переменных (если это не указано специально) будут подразумеваться заданными в тех же единицах измерения, в которых они были занесены в указанную выше базу данных.

С учетом физических соображений и с использованием корреляционного и регрессионного анализа набор возможных предикторов может уточняться и дополняться. Например, используя коэффициенты парной корреляции между предикторами, можно исключить дублирующие аргументы. Согласно [84], две переменные явно коррелированы, если  $|r_{xixj}| \geq 0,7$ . Одним из условий успешного построения уравнения множественной регрессии является независимость входящих в него предикторов. Если такие предикторы характеризуются высоким коэффициентом парной корреляции, то считается, что они дублируют друг друга, и один из них следует удалить из регрессии.

В таблицах 3.1, 3.2 представлены предикторы, отобранные из исходного сформированного их множества с применением метода пошаговой регрессии [82]. Коэффициенты парной корреляции между отобранными предикторами по абсолютной величине, в основном, менее 0,40 (таблица 3.2), т.е. явная коррелированность не выражена, или выражена слабо. При использовании эмпириче-

ского подхода и статистического анализа в условиях ограниченной исходной информации каждый предиктор важен, прежде всего, с точки зрения того, насколько он отражает ситуацию в бассейне в целом.

Таблица 3.1 – Переменные, отобранные на основе регрессионного анализа

Обозначение	Смысловое значение
$Q_{2кв}$	Боковой приток воды в Богучанское водохранилище за второй (апрель, май, июнь) квартал (предиктант)
$S_1$	Максимальный запас воды в снежном покрове в бассейне бокового притока
$X_{10}$	Сумма месячных осадков за октябрь у с. Ванавара
$t_{n10}$	Температура почвы за октябрь у с. Богучаны
$\Sigma t_{1max}$	Сумма максимальных за сутки положительных температур у с. Ванавара за март
$Q_{10}$	средний за октябрь расход воды на р. Непа у д. Ика
$\Sigma X_1$	Сумма осадков с октября по март у с. Ванавара
$\Sigma X_2$	Сумма осадков с октября по март у г. Тайшет
$\Sigma X_3$	Сумма осадков с апреля по июнь у с. Червянка

Таблица 3.2 – Коэффициенты парной корреляции между предикторами

Характеристика	$S_1$	$X_{10}$	$t_{n10}$	$\Sigma t_{1max}$	$Q_{10}$	$\Sigma X_1$	$\Sigma X_2$	$\Sigma X_3$
$S_1$	1,00							
$X_{10}$	0,17	1,00						
$t_{n10}$	-0,39	0,08	1,00					
$\Sigma t_{1max}$	-0,11	-0,14	-0,07	1,00				
$Q_{10}$	-0,04	0,33	0,03	-0,01	1,00			
$\Sigma X_1$	0,43	0,59	-0,14	-0,01	0,13	1,00		
$\Sigma X_2$	0,48	0,07	-0,28	-0,26	0,15	-0,01	1	
$\Sigma X_3$	-0,04	0,12	-0,10	0,06	0,30	-0,04	0,22	1

Первоначально, уравнение линейной регрессии для прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС за второй квартал ( $Q_{2кв}$ ) было получено в следующем виде:

$$Q_{2кв} = 1,35S_1 + 2,38X_{10} - 45,9t_{n10} - 1,89\Sigma t_{1max} + 1,74Q_{10} + 0,913\Sigma X_1 + 0,689\Sigma X_2 + 0,779\Sigma X_3 + 141 \quad (3.1)$$

Согласно этому уравнению боковой приток за второй квартал возрастает:

- с увеличением запасов снега ( $S_1$ );

- с увеличением среднемесячного расхода воды и суммы осадков за октябрь ( $Q_{10}, X_{10}$ );
- с понижением температуры почвы в октябре ( $t_{п10}$ );
- с увеличением количества осадков с октября по март ( $\Sigma X_1, \Sigma X_2$ );
- с увеличением количества осадков с апреля по июнь ( $\Sigma X_3$ );
- с уменьшением суммы положительных температур в марте ( $\Sigma t_{1max}$ ).

Целесообразность включения предикторов в прогностическую модель подтверждается не только физическими соображениями, но и значениями  $t$ -статистик его коэффициентов регрессии. Последние вычисляются как отношения значений коэффициентов к их средним квадратичным ошибкам. Чем больше  $t$ -статистики по абсолютному значению превышают единицу, тем надежнее определяются коэффициенты регрессии. Значения  $t$ -статистик приведены в сводной таблице 3.3.

Для оценки эффективности и точности методики прогноза используется отношение  $S/\sigma$ , где  $S$  – средняя квадратичная ошибка расчета (прогноза) стока половодья,  $\sigma$  – его стандартное отклонение [60]. Чем меньше величина этого критерия, тем точнее и эффективнее методика прогноза [69]. Для модели (3.1) отношение  $S/\sigma = 0,348$ , множественный коэффициент корреляции  $R = 0,934$ ,

Таблица 3.3 – Коэффициенты уравнения регрессии и их  $t$ -статистики

Обозначение предиктора в уравнении (3.1)	Значение коэффициента	$t$ -статистика
Свободный член	141	2,44
$S_1$	1,35	2,75
$t_{10почв}$	-45,9	-5,02
$X_{10}$	2,38	2,62
$Q_{10}$	1,74	2,65
$\Sigma t_{1max}$	-1,89	-4,93
$\Sigma X_1$	0,913	2,63
$\Sigma X_2$	0,689	2,98
$\Sigma X_3$	0,779	1,60



Высокий коэффициент множественной корреляции и значения  $t$ -статистик при аргументах, позволяют предположить репрезентативность аргументов, входящих в прогностическое уравнение.

При значении  $t$ -статистики менее 2,0 предиктор можно не включать в уравнение без заметной потери качества расчетной методики. Из таблицы 3.3 видно, что  $t$ -статистика показателя  $\Sigma X_3$  (Сумма осадков с апреля по июнь у с. Червянка), менее 2,0, что позволяет исключить этот показатель из уравнения регрессии. Таким образом, из-за особенностей формирования бокового притока второго квартала Богучанского водохранилища осадки в период снеготаяния на него влияют слабо, и недоучет этой характеристики существенно не отразится на качестве методики. Благодаря этому, имеется возможность увеличения заблаговременности долгосрочного прогноза бокового притока в исследуемое водохранилище на период половодья. В иных случаях, например, для Красноярского или Саяно-Шушенского водохранилищ, осадки в период снеготаяния влияют более значительно, и для практических расчетов на период заблаговременности принимается их среднемноголетнее значение, что, конечно, снижает качество прогностической модели.

В результате исключения параметра  $\Sigma X_3$  окончательное уравнение линейной регрессии для прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС за второй квартал ( $Q_{2кв}$ ) приняло вид:

$$Q_{2кв} = 1,17S_I + 2,62X_{I0} - 48,5t_{nI0} - 1,76\Sigma t_{Imax} + 2,35Q_{I0} + 0,829\Sigma X_I + 0,889\Sigma X_2 + 197 \quad (3.2)$$

Множественный коэффициент корреляции для этого уравнения  $R = 0,918$ ,  $S/\sigma = 0,370$ . Коэффициенты уравнения регрессии (3.2) и значения их  $t$ -статистик приведены в сводной таблице 3.4.

В результате проведенного анализа было установлено, что влияние предикторов, характеризующих величину и ход осадков в период половодья, оказалось существенно меньшим, чем условия сложившиеся перед началом снеготаяния.

Таблица 3.4 – Коэффициенты уравнения регрессии (3.2) и их  $t$ -статистики

Обозначение предиктора в уравнении	Значение коэффициента	$t$ -статистика
Свободный член	197	2,12
$S_1$	1,17	2,20
$X_{10}$	2,62	2,66
$t_{10_n}$	-48,5	-4,88
$\Sigma t_{1max}$	-1,76	-4,25
$Q_{10}$	2,35	2,09
$\Sigma X_1$	0,829	2,66
$\Sigma X_2$	0,889	2,39

При построении прогностических моделей бокового притока исходные данные были разбиты на обучающую и контрольную выборки. Обучающая выборка использована для построения математических отношений между предиктантом и предикторами. Контрольная выборка служила для получения оценки прогнозных свойств модели на независимых данных, т.е. данных, которые не были использованы для обучения модели. Для обучающей выборки обычно используют 75–80% от объема имеющихся исходных данных. В нашем случае для построения моделей прогноза бокового притока обучающая выборка включала наблюдения за 1980–2012 гг., а контрольная - за 2013–2021 годы.

Прогноз считается оправдавшимся, когда ошибка прогнозируемой величины не превышает допустимую ошибку прогноза  $\delta_{don}$ . За допустимую погрешность прогноза принимается [9] отклонение прогнозируемого значения переменной от ее фактического значения на величину не более чем  $0,674\bar{\sigma}$ . Допустимая ошибка ( $\delta_{don}$ ) прогноза бокового притока за второй квартал составляет  $90 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В приложении А (таблица А.1) приведены результаты расчета по обучающей выборке. Ошибка не превышает допустимую в 31 случаях из 32 (оправдываемость 97 %,  $S/\sigma = 0,370$ ). Расчет на контрольных данных (таблица 3.5) оправдался в 8 случаях из 9, (оправдываемость 89 %),  $S/\sigma = 0,356$ .

Таблица 3.5 – Оценка точности прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал по контрольной выборке (2013–2021 гг.)

Год	Фактический приток (м <sup>3</sup> /с)	Прогноз притока по уравнению 3.2 (м <sup>3</sup> /с)	Ошибка (м <sup>3</sup> /с)
2013	730	660	70
2014	495	506	-11
2015	706	625	81
2016	353	376	-23
2017	250	291	-41
2018	350	400	-50
2019	392	288	<b>104</b>
2020	483	536	-53
2021	400	457	-57

Примечание: Ошибка прогноза, превышающая допустимую ошибку (90 м<sup>3</sup>/с), выделена полужирным курсивом.

### 3.2 Прогноз бокового притока в Богучанское водохранилище с использованием его корреляции со стоком рек-аналогов (способ 2)

В главе 2 показано, что боковой приток в Богучанское водохранилище и сток рек-аналогов достаточно сильно коррелированы. Эту закономерность можно использовать для прогноза бокового притока. В результате, было получено линейное регрессионное уравнение (3.3):

$$Q_{2кв} = 0,316Y_{Ч} + 0,546Y_{М} + 0,138Y_{Н} + 173 \quad (3.3)$$

где, переменные  $Y_{Ч}$ ,  $Y_{М}$ ,  $Y_{Н}$  – это слой стока (мм) рек-аналогов (соответственно, Чадобец, Мура, и Непа) за второй квартал.

Для того чтобы вычислить прогнозное значение бокового притока в уравнение (3.3) нужно подставить соответствующие прогнозные оценки слоя стока рек-аналогов. Для их нахождения необходимо выбрать наиболее подходящие предикторы и получить прогностические уравнения для переменных  $Y_{Ч}$ ,  $Y_{М}$ ,  $Y_{Н}$ . Методологический подход к выбору предикторов для этих переменных совпадает с подходом, использованным для решения аналогичной задачи. Обсудим здесь отдельные аспекты этой проблемы несколько подробнее.

Формирование квартального притока должно подчиняться закону сохранения массы. На его основании можно записать балансовое уравнение для (выраженных, например, в мм слоя воды) компонент водного баланса некоторого водосбора за период половодья:

$$Y = S + X - P - Z, \quad (3.4)$$

в котором:  $Y$  – слой стока с водосбора,  $S$  - накопленное к началу половодья содержание воды в снеге,  $X$  - сумма осадков за период половодья,  $P$  - суммарное задержание до окончания периода половодья воды на поверхности и в грунтах водосбора,  $Z$  - суммарное за период половодья испарение воды с водосбора. Измеряемые (или вычисляемые по измерениям) показатели, относящиеся к бассейнам рек-аналогов и отражающие изменчивость компонент в правой части уравнения (3.4), могут быть предикторами для переменных  $Y_{\text{Ч}}$ ,  $Y_{\text{М}}$ ,  $Y_{\text{Н}}$ .

При подборе возможных предикторов значительное место в практике гидрологических прогнозов отводится выбору косвенных показателей водопоглотительной способности бассейнов. Репрезентативность рассматриваемых показателей может зависеть не только от их частного соответствия измерениям в конкретном месте, но прежде всего от того, насколько хорошо они отражают общие условия в бассейне [58].

В работах [49, 81] рассмотрено влияние на сток весеннего половодья характеристик осеннего увлажнения и промерзания почвы. С наступлением зимнего периода поры достаточно увлажненной почвы забиваются льдом, в результате чего водопроницаемость уменьшается. В промерзшей увлажненной почве отмечается существенно больший запас холода, чем в более сухой. Талая вода, которая весной поступает в промерзшую почву, при наличии достаточного запаса холода в ней частично или полностью замерзает, образуя «запирающий слой». Это явление типично на безлесных участках бассейна. На лесных участках из-за высокой пористости лесных почв запирающий слой образуется редко. А.И. Субботин и В.С. Дыгало [86] показывают, что «интенсивность просачивания в почву талых вод в лесу зависит не столько от глубины промерзания, сколько от степени увлажнения почв». В.Д. Комаров [50], И.Л. Калюжный и К.К. Павлова [47] также отмечают, что основным фактором изменчивости суммарных потерь талых вод является влагонасыщенность бассейна.

Влияние температуры почвы за октябрь на формирование стока половодья обусловлено тем, что «чем ниже температура почвы в начальный период её промерзания, тем интенсивнее осуществляется миграция почвенной влаги к

фронту промерзания, соответственно увеличивается количество льда и запас холода в почве» [4]. В результате в период снеготаяния поступающая в почву талая вода, замерзая, полностью закупоривает поры, образуя «запирающий слой».

С учетом обсужденных выше представлений о физике процесса формирования весеннего стока и применения методов регрессионного анализа из характеристик, сведения о значениях которых имелись в накопленной базе данных, в качестве предикторов для моделей прогноза слоя стока рек-аналогов Чадобец, Мура и Непа получены уравнения:

$$Y_{\text{Ч}} = 1,52 S_1 + 0,535 X_{1(10-3)} + 6,37 Q_{\text{Ч}10-11} - 2,25 \Sigma t_{1\text{max}} - 42,9 t_{n10} - 9,47 T_{12} - 344, \quad (3.5)$$

$$Y_{\text{М}} = 0,638 S_2 + 0,876 S_1 + 0,535 X_{2(10-3)} + 5,31 Q_{\text{М}10-11} - 0,775 \Sigma t_{1\text{max}} + 0,635 S_3 - 121, \quad (3.6)$$

$$Y_{\text{Н}} = 2,82 S_4 + 0,640 X_1 + 2,12 X_{1(10-3)} + 3,58 X_{10} - 0,962 \Sigma t_{2\text{max}} + 1,39 S_5 - 329. \quad (3.7)$$

где,  $S_1$  – максимальный запас воды в снежном покрове у с. Богучаны;  $S_2$  – максимальный запас воды в снежном покрове у с. Ванавара;  $S_4$  – максимальный запас воды в снежном покрове у с. Чемдальск;  $X_1$  – сумма осадков (апрель-июнь) у с. Ванавара;  $X_2$  – сумма осадков (апрель-июнь) у с. Червянка;  $X_{1(10-3)}$  – сумма осадков (октябрь-март), у с. Ванавара;  $X_{2(10-3)}$  – сумма осадков (октябрь-март), у г. Тайшет;  $Q_{\text{Ч}10-11}$  – средний расход воды за октябрь-ноябрь р. Чадобец – с. Яркино;  $Q_{\text{М}10-11}$  – средний расход воды за октябрь-ноябрь р. Мура – с. Ирба;  $t_{n10}$  – температура почвы на глубине 0,2 м за октябрь с. Богучаны;  $\Sigma t_{1\text{max}}$  – сумма максимальных за сутки положительных температур в марте, у с. Ванавара;  $\Sigma t_{2\text{max}}$  – сумма максимальных за сутки положительных температур в марте, у с. Ика;  $S_3$  – разница запаса воды в снеге между 10 апреля и 31 марта у с. Мотыгино;  $S_5$  – разница максимальных и за 31 марта запасов воды в снеге у с. Мотыгино;  $T_{12}$  – среднемесячная температура воздуха за декабрь у г. Тайшет;  $X_{10}$  – сумма осадков за октябрь у с. Бедоба.

В уравнениях (3.5–3.7) коэффициенты парной корреляции между предикторами по абсолютной величине в основном меньше 0,40 (приложение Г), т.е. явная их коррелированность не выражена, или выражена слабо.

Таким образом, для построения модели прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище необходимо определить сток рек-аналогов. В качестве значений переменных  $Y_C$ ,  $Y_M$ ,  $Y_H$  можно брать их оценки из данных фактических наблюдений или оценки, вычисленные по формулам (3.5–3.7). Что касается оценок  $Q_{2кв}$ , то они были получены независимо от оценок  $Y_C$ ,  $Y_M$ ,  $Y_H$ , на основе данных непосредственных измерений в бассейне бокового притока Богучанского водохранилища в 1977–1987 годы (2.5) и данных, полученных водно-балансовым методом по формуле (2.7) за период 1988–2012 гг. Если же для оценки  $Q_{2кв}$  использовать метод, основанный на модели, аналогичной (2.6), то статистические характеристики этой выборки уже будут зависеть от значений  $Y_C$ ,  $Y_M$ ,  $Y_H$  и свойств модели, использованной для вычисления значений  $Q_{2кв}$ .

Расчет бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал по результатам прогноза стока рек-аналогов приведен в таблице 3.6. Эти данные получены на контрольной выборке за 2013–2021 гг. Расчет этого притока на этой выборке оправдался в 8 случаях из 9, (оправдываемость 89 %),  $S/\sigma$  на период испытаний – 0,310.

Таблица 3.6 – Расчет среднего бокового притока за второй квартал по уравнению 3.3 (контрольная выборка)

Год	Фактический боковой приток за 2 квартал	Прогнозная оценка по уравнению 3.1	Ошибка
2013	750	714	36
2014	505	491	14
2015	698	702	-4
2016	373	363	10
2017	230	260	-30
2018	370	412	-42
2019	402	280	<b>122</b>
2020	380	412	-32
2021	420	384	36

Примечание: Ошибка, превышающая допустимую ( $90 \text{ м}^3/\text{с}$ ), выделена полужирным курсивом.

В приложении А (таблица А2) представлены результаты расчета бокового притока с использованием уравнений 3.3, 3.5–3.7 на обучающей выборке (период 1980–2012 гг.). В этом случае прогноз оправдался в 29 случаях из 32, оправдываемость прогноза составила 91 %, а параметр  $S/\sigma = 0,407$ .

Исходя из структуры физического смысла предикторов, входящих в уравнения (3.5–3.7), и сравнивая правые части этих уравнений, можно выделить предикторы, отвечающие за формирование изменчивости от года к году значений тех или иных компонент водного баланса в формуле (3.4) или их комбинаций, например:

для р. Чадобец

$$(S_C + X_C) = 1,52 S_I + 0,535 X_{I(10-3)}, \quad (3.8)$$

$$-(P_M + Z_M) = 6,37 Q_{C10-11} - 2,25 \Sigma t_{I \max} - 42,9 t_{n10} - 9,47 T_{12}, \quad (3.9)$$

для р. Мура

$$(S_M + X_M) = 0,638 S_2 + 0,876 S_I + 0,535 X_{2(10-3)} \quad (3.10)$$

$$-(P_M + Z_M) = 5,31 Q_{M10-11} - 0,775 \Sigma t_{I \max} + 0,635 S_3, \quad (3.11)$$

для р. Непа

$$(S_H + X_H) = 2,82 S_4 + 0,640 X_I + 2,12 X_{I(10-3)}, \quad (3.12)$$

$$-(P_H + Z_H) = 3,58 X_{I0} - 0,962 \Sigma t_{2 \max} + 1,39 S_5 \quad (3.13)$$

Значения констант (-344 мм, -121 мм и -329 мм) в регрессионных уравнениях (3.5)–(3.7) отражают суммы постоянных составляющих компонент баланса, участвующих в формировании притока с бассейнов рек-аналогов. Левые части уравнений (3.8)–(3.13) можно также рассматривать как новые агрегированные предикторы, интерпретируемые как индикаторы соответствующих процессов. Изменчивость таких агрегированных предикторов, индицирующих переменность различных компонент водного баланса в уравнениях (3.8)–(3.13), обуславливает определенную часть изменчивости весеннего стока рек-аналогов, но мера этого влияния разная. В таблице 3.7. представлены некоторые оценки, характеризующие относительные доли такого влияния.

Таблица 3.7 – Статистические характеристики моделей (3.8)–(3.13)

Бассейн-аналог	Коэффициент множественной корреляции	$S/\sigma$	Оценка доли детерминированного вклада компонент баланса	
			для $(S+X)$	для $(P+Z)$
р. Чадобец	0,940	0,380	0,34	0,55
р. Мура	0,931	0,411	0,45	0,66
р. Непа	0,905	0,464	0,46	0,54

*Примечание:* доля детерминированного вклада соответствующих слагаемых определяется по Г.А. Алексееву [2].

Бассейн р. Мура расположен в южном, менее увлажненном районе, и доля детерминированного вклада в изменчивость стока процессов поглощения и испарения оказывается несколько выше, чем для бассейнов Чадобец и Непа, расположенных в средней тайге. Аналогичная закономерность отмечена В.Д. Комаровым и другими авторами [30, 4, 47] в лесостепных и степных районах ЕТР и западной Сибири, где доля детерминированного вклада этих процессов заметно возрастает по сравнению с его величиной в лесной зоне.

### **3.3 Прогноз бокового притока с применением элементов инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова (способ 3)**

В предыдущих двух параграфах данной главы были рассмотрены методы построения прогностических оценок квартального бокового притока в Богучанское водохранилище, основанные на применении линейных аппроксимаций его зависимости от возможных предикторов. На самом деле такие зависимости могут иметь более сложный характер, для аппроксимации которого линейного приближения может быть недостаточно. Если линейную аппроксимацию просто заменить произвольной нелинейной аппроксимацией моделируемой зависимости, то результат со значительной вероятностью может ухудшиться. Чтобы избежать такой неприятности, характер нелинейности аппроксимирующей зависимости оператора должен быть логически обоснован, исходя из некоторых дополнительных представлений о моделируемом объекте. В данном случае мы не будем выполнять такую работу с самого начала, а воспользуемся физико-



статистическими водно–балансовыми уравнениями, вытекающими из инфильтрационно – ёмкостной модели Е.Г. Попова [67]. Конкретный пример, математических соотношений, описывающих оператор подобной модели, возьмем из работы Д.А. Буракова [29]. Эти соотношения для компонент водного баланса названными авторами были записаны в следующем виде:

$$Y = \alpha \left( H + U - P_{\max} \left[ 1 + \left( \frac{H+U}{P_{\max}} \right)^n \int_0^1 \right] \right), \quad (3.14)$$

$$H = S + X - (J + Z), \quad (3.15)$$

$$J + Z = b(X + U) \left[ 1 - f \left( \frac{m - m_{\min}}{\bar{m} - m_{\min}} \right)^{St} \right], \quad (3.16)$$

$$U = c \times \lg[k(m - m_{\min})^{St} + 1], \quad (3.17)$$

где  $Y$  – боковой приток в водохранилище;  $\alpha = K_c(1 - \omega)$  – сборный коэффициент учитывающий долю постоянно бессточной площади ( $\omega$ ) и относительные потери ( $K_c$ ) стока половодья в период спада;  $H$  – слой заполнения вододерживающей емкости;  $(S + X)$  – поступление воды за период половодья;  $Z, J$  – испарение и инфильтрация за этот период;  $U$  – слой начального (на момент начала снеготаяния) заполнения вододерживающей емкости;  $P_{\max}$  – параметр потерь, который характеризует вододерживающую емкость бассейна при наиболее низком предшествующем увлажнении;  $n$  – параметр, используемый при описании характера распределения вододерживающей емкости на площади водосбора;  $m$  – комплексный показатель водопроницаемости почв (3.09);  $m_{\min}$  и  $\bar{m}$  – соответственно его минимальная и средняя величина за период наблюдений;  $k$  – коэффициент значения которого подбирается при оптимизации;  $b$  – коэффициент, используемый при описании зависимости потерь на инфильтрацию и испарение от суммарного поступления воды и комплексного показателя  $m$ ;  $f$  – коэффициент, используемый при описании влияния комплексного показателя  $m$  на емкостное задержание;  $c$  – коэффициент, используемый при описании связи емкостного поглощения с комплексным показателем  $m$ ;  $St$  – показатель степени, учитывающий нелинейность влияния показателя  $m$  на инфильтрационные ( $J$ ) и емкостные ( $U$ ) потери.

Структура приведенных уравнений учитывает закономерности задержания или потерь воды, не попадающей в сток половодья. Заметим, что подобный вид зависимости потерь на впитывание от показателя предшествующего увлажнения бассейнов успешно использовал В.Н. Паршин для прогноза весеннего стока рек территории Северного Казахстана [65].

Модель, основанная на уравнениях (3.14 – 3.17), реализована в виде специализированной компьютерной программы. Последовательность оценки ее параметров с применением методов оптимизации рассмотрена в [29, 82]. Результаты оценки отдельных ее характеристик представлены в таблице 3.8, а на рисунке 3.1 - зависимость  $Y=f(S+X, m)$ , рассчитанная по уравнению 3.16.

Таблица 3.8 – Отдельные характеристики модели (3.14 – 3.17), после ее привязки к данным о формировании притока в Богучанское водохранилище

$c$	$b$	$a$	$f$	$n$	$P_{max}$	$st$	$S/\sigma$
22,9	0,136	0,598	0,538	0,550	215	2,577	0,388

В таблице 3.9 представлены средние многолетние характеристики потерь талых вод, которые рассчитаны по уравнениям 3.14–3.17.

Таблица 3.9 – Средние многолетние характеристики потерь стока

Характеристика потерь	Обозначение	Среднее многолетнее значение (числитель: мм; знаменатель: % суммарных потерь)
Инфильтрация и испарение за период снеготаяния	$J+Z=b(S+x+U) \left[ 1-f\left(\frac{m-m_{min}^{St}}{\bar{m}-m_{min}}\right) \right]$	$\frac{11}{8}$
Емкостное задержание на водосборе	$P_{emk}=P_{max} \left[ 1+\left(\frac{H}{P_{max}}\right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}$	$\frac{122}{92}$
Суммарные потери на водосборе за период половодья	$P_A=P_{emk}+(J+Z),$	$\frac{133}{100}$

Согласно полученным оценкам (таблица 3.9) бассейн Богучанского водохранилища характеризуется инфильтрационно-емкостным типом водопоглощения с преобладанием емкостных потерь, т.е. формирование склонового стока

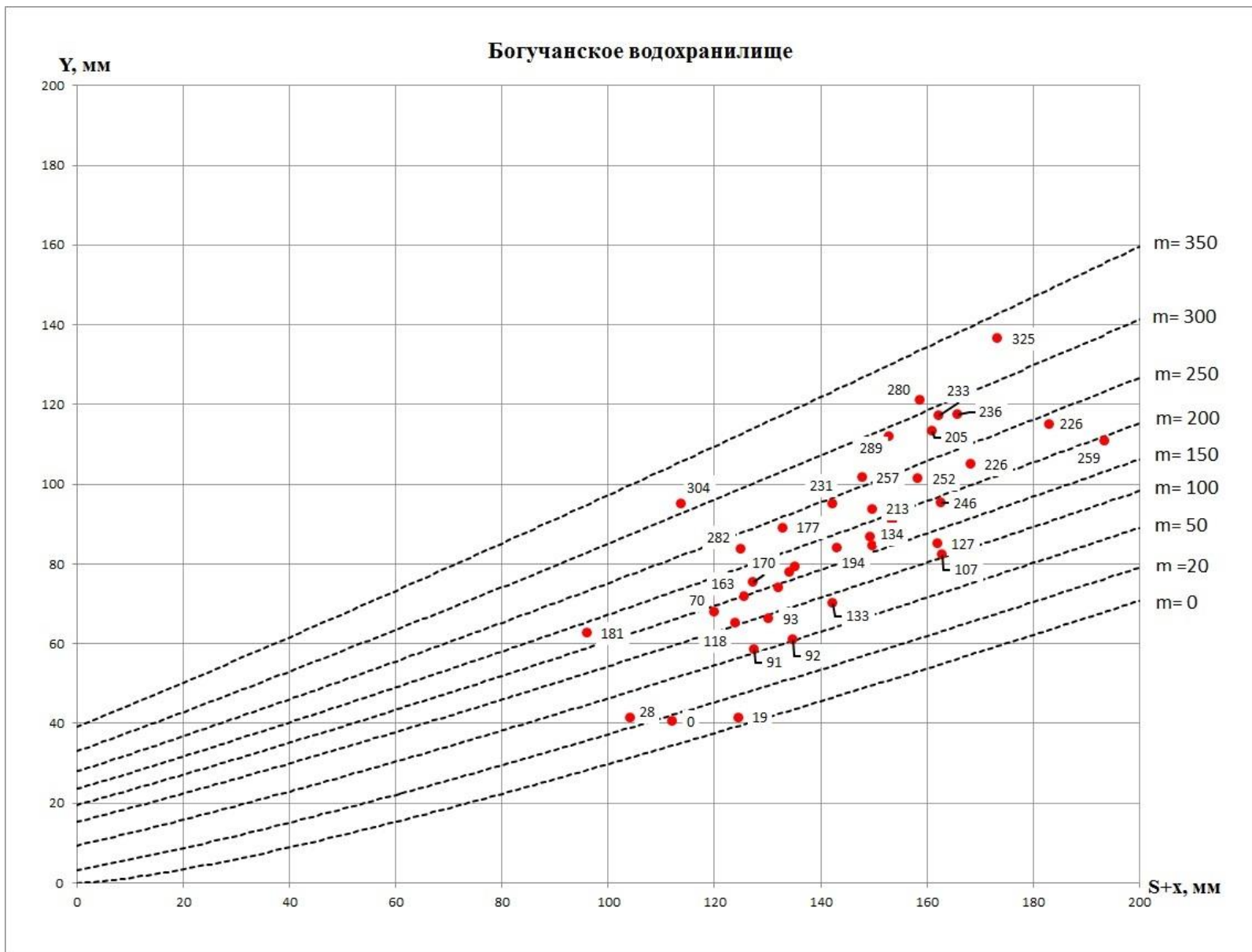


Рисунок 3.1 – Зависимость  $Y = f(S + X, m)$

происходит после заполнения водоудерживающей емкости, когда поступление воды ( $S+x$ ) превышает инфильтрацию и испарение ( $J+Z$ ). Этот механизм особенно ярко проявляется в лесу [68]. Территория Богучанского водохранилища покрыта лесом более чем на 90%, поэтому описываемый механизм как раз характерен для этой территории. Отметим, что при  $S+x = 0$  сток  $Y$  больше нуля, что можно связать с поступлением воды при оттаивании почвенной мерзлоты ( $U$ ).

В приложении А (таблица А3) представлены результаты расчета бокового притока в Богучанское водохранилище с применением инфильтрационно-емкостной модели на обучающей выборке за период 1980–2012 гг. Прогноз оправдался в 30 случаях из 32, т.е. оправдываемость прогноза в этом случае составляет 94 %,  $S/\sigma = 0,388$ . В таблице 3.10 представлен результат проверки методики на контрольной выборке за период 2013–2021 гг. Прогностический расчет бокового притока на контрольной выборке оправдался в 9 случаях из 9, параметр при этом принял значение  $S/\sigma = 0,347$ .

Таблица 3.10 – Расчет бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал на контрольной выборке

Год	Фактический боковой приток за 2 квартал	Расчет по модели	Ошибка
2013	730	649	81
2014	495	494	1
2015	706	619	87
2016	353	398	-45
2017	250	272	-22
2018	350	310	-40
2019	392	482	-90
2020	483	510	-27
2021	400	365	35

Расчеты на обучающей и контрольной выборках показали, что оправдываемость прогноза по описываемой модели достаточно высокая, что позволяет рекомендовать данный метод прогноза к применению на практике.

В целом, рассмотренные в этой главе методики характеризуются оправдываемостью прогноза более 90 %,  $S/\sigma$  – от 0,310 до 0,407. Расчет с приме-

нием уравнений (3.14–3.17) с точки зрения учета физики процесса формирования стока половодья является более предпочтительным, поскольку эти уравнения опираются на определенные известные закономерности формирования стока. Кроме того оператор, аппроксимирующий зависимость стока от действующих факторов, позволяет в какой-то степени учесть ее фактически возможную нелинейность. Тем не менее, в условиях оперативной работы целесообразно рекомендовать расчет по уравнению 3.2 (*методика 1*), в котором схема расчета прогнозируемого притока менее трудоёмка и задействовано меньше предикторов.

## ГЛАВА 4. КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

В практике оперативного прогнозирования часто требуется составлять более детальные во времени прогнозы бокового притока, пусть даже с меньшей заблаговременностью, чем те, что были рассмотрены в предыдущей главе. Для составления таких прогнозов могут использоваться различные подходы и различные модели формирования стока.

### 4.1 Классификация моделей формирования стока

Общие представления о механизме формирования речного стока, положенные в основу построения различных гидрологических моделей, разработаны в 1940 – 1950 годах Огиевским А.В., Алексеевым Г.А., Бефани А.Н., Великановым М.А., Калининным Г.П., Комаровым В.Д., Линслеем Р.К., Поповым Е.Г., Хортоном Р.Е. и многими другими исследователями.

Под математической моделью процесса формирования стока понимается система уравнений и неравенств, которые описывают поступление воды на поверхность водосбора, потери талых и дождевых вод, а также стекание воды по склонам и русловой сети к замыкающему створу. Реализация математических моделей, которые обычно требуют большого количества расчётов, стала возможной только в семидесятых годах прошлого века при использовании первых ЭВМ. Первые разработки и реализации математической модели процессов формирования стока принадлежит Кроуфорду и Линслею (Стенфордская модель) [89]. Рассмотрим, следуя Л.С. Кучменту [55], основные типы математических моделей.

1. *Модели* типа «**черный ящик**», где гидрологические системы рассмотрены как динамические, без явного описания элементарных процессов гидрологического цикла. В качестве примера могут служить «емкостные» модели, в которых параллельно-последовательное соединение емкостей имитирует трансформацию водоотдачи в сток замыкающего створа на выходе. С помощью

процедур определения параметров линейных емкостных систем в ряде случаев можно достаточно точно описать гидрограф.

2. **Составные (концептуальные) модели**, которые основываются на параметрическом описании основных процессов стокообразования с применением физически и экспериментально обоснованных соотношений. В России развитием моделей этого вида занимались М.А. Великанов, А.В. Огиевский [63], В.А. Жук [43], Г.А. Алексеев [2], А.Н. Бефани [8], Г.П. Калинин [46], Е.Г. Попов [67], В.Д. Комаров [49], Ю.Б. Виноградов [36], Л.С. Кучмент [55, 56, 57], А.Н. Гельфан [39], Д.А. Бураков [21], А.В. Игнатов [31] и другие исследователи. Характеристики водосборов в таких моделях являются функциями времени (модели с сосредоточенными параметрами [56]) и не зависят напрямую от пространственных координат. Проблема учета территориального многообразия процессов стока в таких моделях решается при помощи выделения в бассейне ландшафтно-гидрологических районов.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативной прогностической практике широко используется модель формирования талого и дождевого стока В.И. Корня – В.А. Бельчикова [7], в которой на параметрическом уровне описаны основные процессы формирования стока для полевых и лесных частей речного бассейна. На примере этой модели изучены возможности долгосрочного прогноза объема стока талых вод и максимального расхода весеннего половодья ( $Q_{max}$  при различных способах задания метеорологических величин за период заблаговременности прогноза. Исследования проводились на примере бассейнов рек Оки до д. Костомарово, Жиздры до г. Козельска и Угры до с. Товарково. Согласно [76], оценка критерия качества ( $s/\sigma$ ) расчетов слоя стока за 30 лет для бассейнов рек Оки, Жиздры и Угры составляет соответственно 0,55, 0,51 и 0,45, а значения для максимального расхода – 0,61, 0,69 и 0,58.

3. **Физико-математические модели** основываются на последовательном использовании физических законов и типов уравнений, которые применяются в математической физике. В таких моделях могут использоваться как обычные

дифференциальные уравнения, так и уравнения в частных производных. На сегодняшний день наблюдается значительный разрыв между теоретическими результатами физико-математического моделирования стока, и использованием на практике моделей этого типа, даже с учетом достаточно большого количества проведенных исследований в этой области.

Интегрированная информационно-моделирующая система ЕСОМАГ (создатель – Ю.Г. Мотовилов) по уровню описания гидрологических процессов находятся между концептуальными и физико-математическими моделями. Она сочетает программное обеспечение модели формирования стока с системой обработки и управления пространственно распределенной информацией, включая выборку информации из баз данных [92]. Программный комплекс включает модель формирования стока с обыкновенными дифференциальными уравнениями, упрощенно описывающими основные процессы стока на водосборе, а также ГИС, содержащую в себе данные о так называемых «элементарных водосборах», с помощью которых создается модель водосбора нужного масштаба.

#### **4.2 Основные положения концептуальной модели Д.А. Буракова**

В настоящее время в оперативной практике чаще применяются концептуальные модели гидрологических прогнозов. Физико-математические модели с распределенными параметрами, как правило, для своей реализации требуют более обширную гидрометеорологическую информацию [11, 12, 69, 88], которую не всегда удается получить.

В нашем случае в основу разработки методики, предназначенной для краткосрочного прогноза бокового притока воды в Богучанское водохранилище, положена концептуальная математическая модель формирования стока с сосредоточенными параметрами, разработанная Д.А. Бураковым. Модель основывается на параметрическом представлении ключевых процессов формирования стока [32]. Она используется для моделирования стока горно-равнинных рек Сибири и успешно внедрена в оперативную практику в отделах гидрологи-



ческих прогнозов сибирских УГМС. [15, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 26, 28, 33]. Модель позволяет выпускать прогнозы с заблаговременностью до 7 дней с суточным разрешением по времени.

Модель относится к типу комбинированных моделей, т.к. она учитывает закономерности процессов, которые происходят на склонах водосбора и в русле реки [9]. Принципы построения и структура модели представлены на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Принципы построения и структура модели [15, 16, 17, 20]

Для калибровки модели используются данные о снегонакоплении, температуре воздуха, ежедневных осадков, а также о запасах воды в речной системе на дату выпуска прогноза, что в совокупности с дополнительной информацией о закономерностях формирования стока, заложенной в структуру оператора модели, позволяет увеличить точность прогнозирования ежедневных уровней (расходов) воды. Данные кратко- и среднесрочных метеорологических прогнозов используются для задания температуры и осадков за период заблаговременности.

### 4.3 Комментарии к реализации отдельных фрагментов модели

Обсудим отдельные важные особенности реализации модели Д.А.Буракова применительно к Богучанскому водохранилищу. Напомним, что бассейн водохранилища представлен частично заболоченным плато с широкими и плоскими междуречьями.

**Разделение бассейна на высокие зоны.** Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта в рассматриваемом бассейне осуществляется путем выделения высотных зон. При таком подходе именно они являются территориальными единицами осреднения гидрометеорологических характеристик. Тем самым учитывается различие ландшафтно-климатических условий в бассейне бокового притока Богучанского водохранилища. При реализации модели было выделено четыре высотные зоны, разделенные границами, которые проводились с шагом 100 м по высоте.

**Снегонакопление и снеготаяние.** Э.М. Ольдекоп выдвинул предположение, что существует приближенное соотношение между суммами зимних осадков на нижних и верхних уровнях горного склона за конкретный год [64]. Для исследуемой территории распределение средних многолетних значений запаса снега по высотным зонам  $\bar{S}(H)$  получено с использованием данных снегомерных съемок Росгидромета (глава 1, рисунок 1.5). Располагая данными о характеристиках снежного покрова, полученными на опорной метеостанции, можно рассчитать снегозапас  $S(H)$  для высотной зоны  $H$ . Далее, зная температуру воздуха и коэффициент таяния, по методике А.Г. Ковзеля [48] рассчитываются ход суточного поступления талой воды на поверхность почвы и размеры покрытой снегом площади для высотных зон.

В нашем случае дополнительно использовались сведения о динамике площади снегового покрытия, получаемые методами космического мониторинга [85]. Спутниковая информация была обработана с помощью специального программного обеспечения [93, 97, 98, 99]. По результатам исследования выполнено сопоставление временного хода заснеженности по высотным зонам за

2006–2018 гг., рассчитанного по формулам, принятым в модели, и по спутниковым данным. В результате оказалось, что полученные двумя методами оценки отличались незначительно. Если же оценки заснеженности по космическим данным существенно отличаются от рассчитанных по модели, то необходимо внесение соответствующих корректировок. В первую очередь речь идет об уточнении распределения средних многолетних значений снегозапасов  $\bar{S}(H)$  по высотным зонам. В нашем случае необходимости в такой корректировке не возникло.

**Водоотдача с высотной зоны.** Расчет водоотдачи в период снеготаяния для  $i$ -й высотной зоны бассейна водохранилища ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) выполняется на основе инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова [21, 67]. Для такого расчета применялись следующие формулы:

$$Y_i(t) = (1 - w_i) \left\langle H_i(t) - P_{\max} th \left[ \frac{H_i(t)}{P_{\max}} \right] \right\rangle, \quad (4.1)$$

$$H_i(t) = U_i + \sum_{j=t_0}^{j=t} (h_{ci} + x_i - z_i - I)_j, \quad (4.2)$$

где:  $t$  – время;  $Y_i(t)$  и  $H_i(t)$  – соответственно, интегральный слой стока и слой воды, поступившей на поверхность  $i$ -й высотной зоны, за период от начала снеготаяния  $t_0$  до момента  $t$ ;  $w_i$  – доля постоянно бессточной площади для  $i$ -й высотной зоны;  $P_{\max}$  – водоудерживающая емкость бассейна в условиях наиболее низкого предшествующего (осеннего) увлажнения;  $th$  – функция гиперболического тангенса;  $U_i$  – слой заполнения водоудерживающей емкости перед началом снеготаяния;  $h_{ci}$ ,  $x_i$ ,  $z_i$  – соответственно, слой талой воды, слой осадков и слой испарившейся воды за текущий интервал  $j$  в пределах  $i$ -й высотной зоны;  $I$  – количество просочившейся воды через иллювиальные (или подпахотные) горизонты за пределы водоудерживающей емкости.

Просачивание  $I$  приближенно принимается равным суточному боковому притоку воды в водохранилище в конце типовой кривой спада, характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

В начальный период снеготаяния слой заполнения емкости  $U_i$  формируется в результате выпадения предшествующих дождей и миграции влаги в зимний период к фронту промерзания. Перед началом снеготаяния слой воды  $U_i$  находится в замерзшем состоянии. Его величина оценивается по формуле [21]:

$$U_i = d + c \times \lg(m+1) + \text{grad}U \times \left(\frac{\Delta Z_i}{100}\right), \quad (4.3)$$

где  $d$  и  $c$  – коэффициенты, оцениваемые при калибровке модели;  $m$  – комплексный показатель водопроницаемости почв бассейна, учитывающий осеннее увлажнение и промерзание;  $\text{grad}U$  – градиент, учитывающий высотное изменение слоя начального заполнения водоудерживающей емкости;  $\Delta Z_i = Z_i - Z_1$  – среднее превышение  $i$ -й высотной зоны над первой;  $Z_i$  и  $Z_1$  – соответственно, средние высоты  $i$ -й и 1-й высотных зон.

В качестве характеристик, которые могут быть индикатором показателя водопроницаемости почв  $m$  в формуле (4.3), были рассмотрены различные параметры, определяющие предвесеннее состояние бассейнов-аналогов. Наиболее подходящей оказалась оценка переменной-индикатора для этого показателя, вычисляемая по формуле (3.10). На рисунке 4.6 представлены графики зависимости слоя заполнения емкости  $U_i$  перед началом снеготаяния от такого индикатора. Значения  $U_i$  рассчитаны по формуле (4.3) после подстановки значений оптимальных параметров для каждой из четырех высотных зон бассейна водохранилища.

Среднее превышение высотных зон составляет величину порядка 100 м. Увеличение слоя  $U_i$  между первой и четвертой зоной ( $\Delta U = U_4 - U_1$ ) при заданном значении  $m$  составляет примерно 7 мм. При изменении косвенного показателя водопроницаемости почв ( $m$ ) в пределах от 0 до 35 слой заполнения емкости  $U_i$

увеличивается примерно на 18 мм (рисунок 4.2). Расчеты показывают, что соответствующие изменения притока в русловую сеть, выраженного в мм слоя воды, имеют тот же порядок.

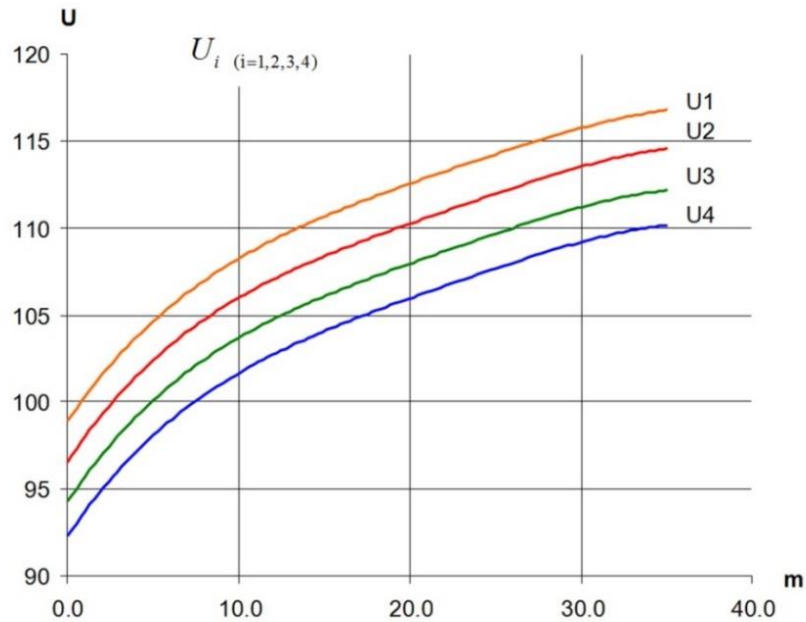


Рисунок 4.2 – Зависимость  $U_i(m)$ , рассчитанная по формуле (4.4) для высотных зон бассейна Богучанского водохранилища

Водоотдача высотной зоны  $u_i(t)$ , под которой, согласно Е.Г. Попову, понимается слой стока, образующийся на склонах за расчетную единицу времени (сутки), определяется по формуле

$$u_i(t) = Y(H_t) - Y(H_{t-1}). \quad (4.4)$$

**Склоновый приток в русловую сеть** Приток  $q_i(t)$ , мм/сут в русловую сеть рассчитывается отдельно для каждой высотной зоны по его взаимосвязи с динамичным (гравитационным) запасом воды в бассейне [17]:

$$\begin{cases} W_i(t) = W_i(t-1) + u_i(t) - q_i(t), \\ q_i(t) = \alpha_i(t) \left[ \frac{W_i(t-1) + W_i(t)}{2} \right]^n, \end{cases} \quad (4.5)$$

где:  $\alpha_i(t)$  – коэффициент, истощения запаса воды, характеризующий гидравлические условия формирования склонового стока;  $n$  – уточняемый при оптими-

зации модели параметр. Расчет притока воды в русловую сеть в период снеготаяния с каждой высотной зоны с применением системы уравнений (4.5) выполняется итерационным методом от начального условия для  $W_i$ .

В начальный период снеготаяния значительная часть образовавшейся талой воды не поступает в русловую сеть, накапливаясь под снегом. По мере схода снега растаявшая и аккумулятивная в снежной толще вода поступает на поверхность бассейна. Для учета этого явления параметр  $\alpha_i(t)$  определяется по следующей схеме [34]. В период снеготаяния:

$$\alpha_i(t) = \alpha_0 \exp \left[ \frac{-\beta \times S_{o_i}(t-1)}{W_i(t-1) + 1} \right] \quad (4.6)$$

где  $\alpha_0$  – максимальные значения  $\alpha$ , наблюдаемое при отсутствии снежного покрова на склонах;  $S_{o_i}(t-1)$  – оставшийся снеговой запас на склонах в предшествующие сутки (после схода снега при  $S_{o_i}(t-1) = 0$  получим  $\alpha_i(t) = \alpha_0$ );  $\beta$  – коэффициент, учитывающий снижение скоростей склонового стока вследствие сопротивления снежного покрова.

При похолоданиях сопротивление движению воды со склонов возрастает из-за появления ледовых образований, что рекомендуется учесть следующим приближенным соотношением для  $\alpha_i(t)$ :

$$\alpha_i(t) = \frac{\alpha_i(t-1)}{(1 + 0,33 |\theta^\circ|)} \quad (4.7)$$

где  $|\theta^\circ|$  – абсолютное значение величины отрицательной среднесуточной температуры воздуха. Коэффициент 0,33 (в знаменателе) может быть уточнен путем подбора при оптимизации модели.

После определения слоя склонового стока для каждой высотной зоны находится среднее взвешенное значение объема стока для всего бассейна:

$$q(t) = \sum_{i=1}^4 q_i(t) \times \varphi_i \quad (4.8)$$

где  $\varphi_i$  – площадь  $i$ -й высотной зоны (всего их четыре).

Так же, в модели приближенно учитывается влияние таяния почвенной мерзлоты на формирование склонового стока. Методика приближенного учета таяния почвенной мерзлоты рассмотрена в [34].

Прогноз бокового притока в водохранилище. На основе оценки склонового притока  $q(t)$  прогноз бокового в водохранилище Богучанской ГЭС  $Q(t+\Delta t)$  на момент  $t+\Delta t$  вычисляется [21] по формуле, которую обозначим как модель «А»:

$$Q(t+\Delta t) = \int_0^{\Delta t} q(t+\Delta t-\tau) f_h(\tau) d\tau + Q_{min}. \quad (4.9)$$

В этой модели к склоновому стоку добавляется компонента  $Q_{min}$  – устойчивое подземное («базисное») питание рек. Дополнительно необходимо также учесть запасы воды в русловой сети, имеющиеся на момент  $t$  выполнения прогнозных расчетов. Для этого в правую часть (4.9) добавляется еще одно слагаемое  $Q_w(t+\Delta t)$ , и уравнение принимает вид

$$Q(t+\Delta t) = \int_0^{\Delta t} q(t+\Delta t-\tau) f_h(\tau) d\tau + Q_w(t+\Delta t) + Q_{min}. \quad (4.10)$$

Можно конечно вклад  $Q_w(t+\Delta t)$  оценивать по той же технологии, что и составляющую, заключенную в (4.10) в квадратных скобках, но если имеются какие-либо прямые оценки запасов воды в русловой сети на момент  $t$ , то можно попробовать другой подход к решению этой задачи.

Пусть на каждом  $i$ -м участке речной сети имеется измерение уровня. Тогда запас воды в пределах такого участка на момент составления прогноза можно связать с соответствующим уровнем приближенным соотношением:

$$W_i(t) \approx \omega_i(H_i(t)) L_i, \quad (4.11)$$

где:  $\omega_i(H_i(t))$  – площадь поперечного сечения реки на  $i$ -ом участке, как функция уровня воды  $H_i(t)$ ;  $L_i$  – длина участка.

Кроме оценок запасов воды для вычисления  $Q_w(t+\Delta t)$  необходимо еще определить какая часть этой воды достигнет створа контроля бокового притока к моменту  $t+\Delta t$ . Не будем вдаваться в детали этой возможной технологии, а просто заменим уравнение (4.10) аппроксимирующим его выражением, в котором используются не только сведения о запасах (или уровнях) воды в русловой

сети в момент  $t$ , но и о тенденциях их изменения. В итоге предлагается вычислять прогноз бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС на момент  $t+\Delta t$ , используя следующую формулу, которую будем называть моделью «Б»,

$$Q(t+\Delta t) = \left[ c_0 \int_0^{\Delta t} q(t+\Delta t-\tau) f_h(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^m c_i (H_i(t) - H_{i\min})^{Y1} + \sum_{i=1}^m c_{i+m} (H_i(t) - H_i(t-1)) \right]^{1/Y2} + Q_{\min} \quad (4.12)$$

В этой модели:  $Q(t+\Delta t)$  – расход воды бокового притока;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $f_h(t)$  – бассейновая кривая добега-ния склонового притока;  $Q_w(t+\Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловлен-ная истощением начального (на момент выпуска прогноза  $t$ ) запаса воды в рус-ловой сети бассейна;  $Q_{\min}$  – устойчивое подземное («базисное») питание реки;  $H_i$  – уровни, отражающие запасы воды в русловой сети в соответствующие мо-менты времени,  $Y1, Y2, c_0, c_1, c_2, \dots$  - коэффициенты, которые определяются при оптимизации модели.

Интеграл в правой части формулы (4.12) характеризует составляющую расхода воды в момент  $(t+\Delta t)$ , обусловленную поступлением талых и дождевых вод в речную сеть за период заблаговременности прогноза. Для описания про-цесса движения воды в руслах в выражение под знаком интеграла входит кри-вая добегаания  $f_h(\tau)$ , которая характеризует последовательность прохождения через замыкающий створ объёмов воды, поступивших со склонов в русловую сеть. Эта кривая аппроксимируется распределением плотности вероятности, па-раметры которого подбираются при оптимизации модели [21]. Другие компо-ненты правой части, объединяемые операторами суммирования  $\sum$ , аппроксими-руют закономерности формирования составляющих бокового притока, опреде-ляемых запасами воды  $W_i(t)$ , присутствующими в русловой сети на момент со-ставления прогноза, а также тенденциями их изменения. Особенностью модели «Б» является то, что вместо прямых оценок этих запасов можно использовать их индикаторы, в частности, данные о значениях уровня воды на реках-анало-гах.



#### 4.4 Оценка параметров модели по материалам наблюдений за 1977-2012 гг.

Для получения сведений, необходимых для привязки модели к водосбору бокового притока Богучанского водохранилища были отобраны наиболее репрезентативные метеорологические станции (см. Главу 1, рисунок 1.5). При оценке параметров модели были использованы материалы наблюдений гидрометеорологических наблюдений за период с 1977 по 2012 г, а именно:

- ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуры воздуха по 5 станциям (п. Абан, с. Богучаны, п. Чемдальск, с. Ванавара, г. Тайшет);
- сведения о запасах воды в снежном покрове по 8 станциям (с. Ванавара, п. Чемдальск, с. Богучаны, п. Мотыгино, д. Бедоба, с. Ирба, п. Северо-Енисейский, п. Татарка) на конец второй декады марта;
- измерения ежедневных расходов (уровней) воды на 3-х гидрологических постах (р. Мура – с. Ирба, р. Чадобец – с. Яркино, р. Непа – с. Ика), используемые для расчета бокового притока.

В задаче оптимизации модели использовались ежедневные данные по каждому году за период с 21 марта по 30 июня. Поиск оптимума параметров модели осуществлялся по методу Розенброка. В этом методе на каждой очередной итерации производится преобразование системы координат таким образом, чтобы в их новой системе одна из осей координат всегда совпадала с направлением шага поиска оптимума на предыдущей итерации [10, 94].

Оценка параметров модели осуществлялась в два этапа. На первом этапе определялись параметры, необходимые для модели «А» (4.9), в которой исходные запасы воды в речной системе не учитываются. На этом этапе определяются параметры  $w_i, P_{max}, d, c, gradU, \alpha_0, \beta$ , участвующие в вычислении склонового притока воды в русловую сеть и параметры кривой его руслового добегаания до водохранилища. Часть параметров этой модели определяется напрямую по данным измерений, а часть с использованием процедуры оптимизации модели. Примеры модельных расчетов на обучающей выборке приведены в приложении Б.

Сделаем замечание по поводу оценки одного из параметров модели «А», а именно, параметра  $w_i$ . В бассейне бокового притока Богучанского водохранилища преобладают светлохвойные леса с наибольшим распространением сосны. Наличие легких супесчаных и водопроницаемых хрящеватых почв объясняет значительную долю площади, на которой отсутствует поверхностный сток. Особенно велика она для нижней высотной зоны бассейна. По результатам оптимизации ее доля для всего бассейна составляет 0,38 (или 38 %), что согласуется с результатами анализа условий формирования стока на водосборе (доля площади сосновых боров на песчаных почвах, в пределах которой поверхностный сток практически отсутствует).

На втором этапе решения задачи оптимизируется более полная модель «Б» ( формула 4.12). На этом этапе определяются параметры  $c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots$ , отражающие влияние начальных (на дату выпуска прогноза) запасов воды в русловой сети, и корректирующие параметры  $c_0, Y1$  и  $Y2$ . Полученные в процессе первого этапа оптимизации параметры модели «А» на втором этапе используются без изменений.

В рамках такого двухэтапного подхода уменьшается количество оцениваемых за один этап оптимизации параметров, что повышает устойчивость результата решения этой задачи. Кроме того, на втором этапе отсутствует необходимость в прямых расчетах запасов воды в речной сети. Также не требуется рассчитывать ординаты кривой добегания для русловых объемов  $W_i(t)$ , так как соответствующее запаздывание поступления этой воды в водохранилище учитываются через значения коэффициентов  $c_i$ .

Оценка параметров модели «Б» производится с использованием необходимых данных, записанных в специальные файлы, и компьютерной программы, реализующей рассматриваемую модель. После определения значений всех параметров они становятся неотъемлемой частью оператора модели, а сама такая модель с известными числовыми параметрами в дальнейшем используется для контрольных или оперативных прогностических расчетов бокового притока.

#### 4.5 Испытание модели на независимых данных за 2013-2021 гг.

Рассмотрим результаты краткосрочного прогнозирования бокового притока в Богучанское водохранилище с использованием модели «Б» (формула 4.12). Контрольный прогноз выполняется с использованием не участвовавших в построении модели данных. Оперативный прогноз бокового притока строится на основе текущих наблюдений за уровнем воды, а также метеорологического прогноза среднесуточной температуры и суточной суммы осадков на метеостанциях. Естественно, при решении задачи выбираются те метеостанции, данные по которым использовались при определении параметров модели. Заблаговременность оперативных прогнозов притока воды ограничена заблаговременностью метеорологических прогнозов и составляет от 1 до 7 суток.

На основе контрольных расчетов, выполненных по материалам независимых наблюдений в период 2013–2021 гг., были получены оценки прогностической способности модели. Обобщенные критерии качества прогнозов, характеризующие их точность, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Показатели точности краткосрочного прогноза бокового притока

Заблаговременность прогноза, сутки	Средняя квадратичная ошибка прогноза $S$ , м <sup>3</sup> /с	Среднее квадратичное отклонение расхода воды за период заблаговременности прогноза $\sigma\Delta$ , м <sup>3</sup> /с	Критерий качества $S/\sigma\Delta$
1	54,6	94,9	0,58
2	90,5	182	0,50
3	114	260	0,44
4	129	331	0,39
5	139	395	0,35
6	146	453	0,32
7	158	507	0,31

На рисунке 4.3 представлены также примеры графиков фактического и рассчитанного по модели гидрографа бокового притока воды в Богучанское водохранилище в 2014 и 2015 гг.

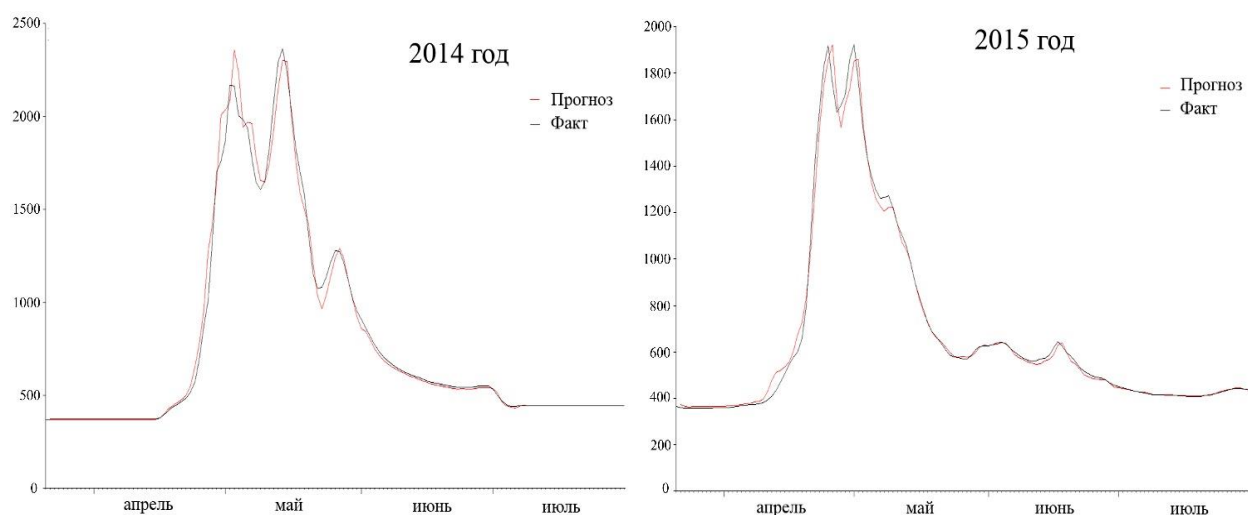


Рисунок 4.3 – Гидрограф бокового притока в Богучанское водохранилище  
 — фактический приток; — прогноз с заблаговременностью 2 дня.

Полученные оценки качества модели (4.12) и положительные результаты испытания методики прогноза позволяют рекомендовать её для составления оперативных краткосрочных прогнозов бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты настоящей работы состоят в следующем.

1. В ходе исследования на основе физических представлений о закономерностях формирования стока составлена база доступных данных, включающая оценки значений более 100 возможных предикторов бокового притока в Богучанское водохранилище. С применением методов последовательного регрессионного анализа из этого множества переменных были выделены наиболее подходящие предикторы, характеризующие условия формирования бокового притока в это водохранилище.

Исследование результатов регрессионного анализа показало, что влияние предикторов квартального притока, характеризующих величину и ход осадков в период половодья, является существенно меньшим, чем предикторов, отражающих условия, сложившиеся в предшествующий ему осенне-зимний период. Благодаря этой особенности были разработаны методики прогноза бокового притока, в которых используются только предикторы, описывающие условия, сложившиеся до начала снеготаяния.

2. Прогноз весеннего стока с водосбора бокового притока в Богучанское водохранилище, основывается на определении запасов воды в снежном покрове и к оценке доли ее поглощения на территории этого бассейна. Ключевым фактором, определяющим потери весеннего стока в рассматриваемых условиях, является осеннее увлажнение водосборов и другие факторы формирования водопроницаемости почв. Для их описания в работе успешно использованы комплексные показатели, которые определяются по данным об осеннем стоке рек-аналогов, температуре почвы за осенний период, среднемесячным осенним осадкам, суммам положительных температур в марте и другим доступным для прямой оценки характеристикам.

3. Расчет бокового притока, в условиях отсутствия регулярных наблюдений за стоком малых рек в рассматриваемом бассейне Богучанского водохранилища, может быть выполнен гидрометрическим методом с применением имеющихся данных по рекам-аналогам, расположенным на сопредельных с этим

бассейном территориях. В работе использована методика расчета, основанная на данных наблюдений за боковым притоком в период с 1977 по 1987 годы, когда в бассейне водохранилища проводились гидрологические наблюдения на малых реках. Другой метод расчета бокового притока основывается на водно-балансовом соотношении и использовании информации о стоке р. Ангары в нижнем по течению створе (пос. Сыромолотово), и верхнем створе (Усть-Илимская ГЭС). Сравнение на пересекающемся временном интервале расчетных оценок притока, полученных водобалансовым и гидрометрическим методами, показал их близкую сходимость (коэффициент корреляции более 0,95). Этот результат позволил получить оценки бокового притока в Богучанское водохранилище с разным разрешением по времени, которые в дальнейшем были названы фактическими значениями бокового притока и использованы при создании методик его прогноза.

4. Разработаны три методики долгосрочного прогноза квартального бокового притока в Богучанское водохранилище в период половодья.

Первая методика основана на использовании эмпирических связей притока и различных гидрометеорологических характеристик, контролируемых на исследуемой территории. Оправдываемость расчета притока по рассматриваемому способу на обучающей и контрольной выборке имела значение, соответственно, 97% и 89%. На зависимом материале критерий точности аппроксимации ( $S/\sigma$ ) фактических значений притока составил величину 0,37.

Вторая методика включает в себя предварительный прогноз стока рек-аналогов Мура, Чадобец и Непа и дальнейший пересчет его в прогноз бокового притока в водохранилище. Оправдываемость этой методики прогноза на обучающей и контрольной выборке составила 91% и 89%, соответственно. Критерий качества  $S/\sigma$  на зависимом материале был равен 0,407.

В третьей методике используются дополнительные сведения о закономерностях формирования стока и описывающие их уравнения, вытекающие из инфильтрационно-ёмкостной модели Е.Г. Попова. Оправдываемость данной методики на обучающей выборке составила 94 %, на контрольной выборке - 100

%. Критерий  $S/\sigma$  на обучающей выборке имел значение 0,388. Эта методика прогноза бокового притока выглядит предпочтительней по сравнению с двумя другими, поскольку в ней используются уравнения аппроксимирующие зависимость стока от действующих факторов с учетом ее нелинейности. Однако в условиях оперативной работы целесообразно рекомендовать прогнозирование квартального притока по первой методике, в которой схема расчета менее трудоёмка.

5. Методика краткосрочного прогноза бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС с суточным разрешением по времени построена на основе концептуальной модели Д. А. Буракова. Эта модель включает в себя блоки, описывающие процессы снегонакопления, снеготаяния, поглощения воды на склонах, формирования склонового притока в русловую сеть, русловое добежание воды до замыкающего створа. Реализация модели позволяет детальнее исследовать режим формирования речного стока. Появляется возможность получения расчетных характеристик снегонакопления, снеготаяния и водоотдачи бассейна по высотным зонам. При построении модели применяются стандартные данные гидрометеорологических наблюдений (температура, осадки, уровни воды). В процессе адаптации модели применительно к водосбору бокового притока в Богучанское водохранилище также использовались наземные и спутниковые данные о состоянии снегового покрытия бассейна. Учет запасов воды в русловой сети по данным об ее уровнях на момент составления прогноза и аппроксимация их влияния на прогнозируемую характеристику существенно повышает точность модельных расчетов.

Критерий качества методики краткосрочного прогноза бокового притока ( $S/\sigma\Delta$ ) при различной его заблаговременности входит в интервал 0,31–0,58, что указывает на успешность прогнозов. Проведенные авторские испытания и прогнозы в оперативном режиме показали эффективность разработанной методики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация и внедрение технологии прогноза ежедневных и максимальных уровней воды на Средней и Нижней Оби, Чарыше и Томи: отчёт о НИР и ОКР (заключительный) / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Среднесибирское УГМС, Западно-Сибирское УГМС, Обь-Иртышское УГМС; рук. Бураков Д. А.; исполн.: Богданова В. Ф. [и др.]. – Красноярск, Новосибирск, Омск, 2012. – 48 с. – УДК 556.536.164. – № ГР 01201178219. – Инв. № 02201356801.
2. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей / Г.А. Алексеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 363 с.
3. Аполлов Б.А. Метод водного баланса в применении к гидропрогнозам / Б. А. Аполлов // Метеорология и гидрология. – 1935. – № 1–2.
4. Аполлов Б.А. Курс гидрологических прогнозов / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров // Л. Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
5. Астраханцев В. И. Ангара и ее бассейн (гидрологический очерк)./ В.И. Астраханцев. – М.: АН СССР, 1962. — 50 с.
6. Афанасьев А. И. Методические указания по составлению долгосрочных прогнозов бокового притока воды в Богучанское водохранилище за период половодья: технический отчет / А.И. Афанасьев. – М.: Госкомгидромет СССР, 1985. – С.21–30.
7. Бельчиков В.А. Модель формирования талого и дождевого стока для лесных водосборов/ В.А. Бельчиков, В.И. Корень // Труды Гидрометцентра СССР. - 1979.- вып. 218. - С. 3-21.
8. Бефани А.Н. Основные виды паводочного стока с горных водосборов и математические модели паводков / А.Н. Бефани // Метеорология, климатология и гидрология. Киев-Одесса, 1980. Вып. 16. С. 37–46.
9. Бефани Н. Ф. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам / Н. Ф. Бефани, Г. П. Калинин – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 391 с.



10. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии: учебное пособие для студентов химико-технологических специальностей вузов / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров ; под реакцией чл.-корр. АН СССР В. В. Кафарова. - Москва : Химия, 1969. - 563

11. Бураков Д. А. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири / Д. А. Бураков, О.И. Иванова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 6. – С. 87–100.

12. Бураков Д. А. Водно–балансовые зависимости для прогноза стока талых вод в природных зонах юга Западно–сибирской равнины / Д. А. Бураков, О.С. Литвинова // География и природные ресурсы.– Иркутск. 2010. № 3. – С.111–120.

13. Бураков Д. А. Гидрологический анализ весеннего половодья в лесной зоне Западно–Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири.– Томск. 1978. – Вып. 10.С. 69–89.

14. Бураков Д. А. Гидрологический анализ весеннего половодья равнинных рек лесной зоны и построение макрогенетических моделей его прогноза (на примере Западной Сибири): дис. док. геогр. наук / Д. А. Бураков. – Томск, 1979. – 268 с.

15. Бураков Д. А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС с применением математической модели / Д. А. Бураков, А. А. Адамович // Метеорология и гидрология. – 2006. – №1. – С. 95–105.

16. Бураков Д. А. К оценке параметров уравнений, аппроксимирующих кривую руслового добегаания // Водные ресурсы. – 1978. – № 4, – С. 21–24.

17. Бураков Д. А. Кривые добегаания и расчёт гидрографа весеннего половодья / Д. А. Бураков – Томск: Изд–во ТГУ, 1978. – 129 с.

18. Бураков Д. А. Ландшафтно-гидрологическое районирование в моделях прогноза речного стока (на примере бассейна Верхней Оби)/ Д. А. Бураков, Н.В. Горошко // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск. – 2015. – С. 14–17.

19. Бураков Д. А. Математическая модель прогноза ежедневных уровней воды горной реки/ Д. А. Бураков, И. П. Вершинина // Охрана окружающей среды и природных ресурсов стран Большого Алтая [Текст] : материалы междунар. науч.–практич. конф. / ред. Г. Я. Барышников. – Барнаул : Изд–во АлтГУ, 2013 – С. 40–44.
20. Бураков Д. А. Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов/ Д.А. Бураков // Метеорология и гидрология.– 1978. №1.– С. 49–59.
21. Бураков Д. А. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы/ Бураков Д. А., Каропова Е.Д., Шайдуров В.В. // Вестник Красноярского государственного университета (физико-математические науки). – 2006. – вып.4. – С. 3–19.
22. Бураков Д. А. Метод прогноза максимальных уровней весеннего половодья реки Томи у г. Томск и результаты его применения на практике / Бураков Д. А., Космакова В. Ф. // Климатология и гляциология Сибири : Матер. Междунар. научно-практич. конф. – Томск : Изд–во ЦНТИ, 2012. – С. 53–55.
23. Бураков Д. А. Методы прогноза водного режима Сибирских рек на рубеже третьего тысячелетия / Бураков Д. А., Маркова Е. Э, Авдеева Ю. В., Ромасько В. Ю., Григорьева Н. Е., Инишев Н. Г., Игловская Н. В., Косырькова (Вершинина) И. П., Мельникова О. В. // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: Матер. Междунар. научн. конф. – Томск : Изд–во НТЛ, 2000. – С. 381–385.
24. Бураков Д. А. Методы расчета и прогноза ежедневного бокового притока в Богучанское водохранилище // Д. А. Бураков, Л. А. Путинцев // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №1. – С. 54–58.
25. Бураков Д. А. Модели расчета и прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС / Д. А. Бураков, Л. А. Путинцев // Материалы 7-го Всероссийского гидрологического съезда. – СПб.: 2013.

26. Бураков Д. А. Модель прогноза уровней воды весеннего половодья и дождевых паводков на реках бассейна Верхнего Амура/ Бураков Д. А., Иванова О. И., Лариошкин В. В. // Климатология и гляциология Сибири: Матер. Междунар. научно-практич. конф. – Томск : Изд-во ЦНТИ, 2012. – С. 67–69.

27. Бураков Д. А. Некоторые итоги экспедиционных наблюдений за формированием стока на малом водосборе в условиях Васюганья. Проблемы гляциологии Алтая / Д.А. Бураков, А.И. Петров // Материалы научной конференции, посвященной 80-летию гляциолога М.В. Тронова.– Томск: Издательство Томского университета, 1972.

28. Бураков Д. А. О результатах испытания методики краткосрочного и долгосрочного прогноза притока воды в Саяно–Шушенское водохранилище в период открытого русла / Д. А. Бураков, Л. А. Младенцева, С. Э. Вахрушева, А. А. Адамович // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов: – Москва, 2002. – № 30.

29. Бураков Д. А. Основы гидрологических прогнозов объема и максимума весеннего половодья в лесной зоне Западно–Сибирской равнины/ Д.А. Бураков // Вопросы географии Сибири.– Томск. 1978. – Вып. 11.– С. 3–49.

30. Бураков Д. А. Особенности формирования и прогноз весеннего стока южной тайги Западно-Сибирской равнины / Д.А. Бураков // Известия АН СССР, сер. географическая. – М.– 1970.– №6.

31. Бураков Д.А. Прогнозирование притока воды в Красноярское и Саяно-Шушенское водохранилища во втором квартале года / Д.А. Бураков, И.Н. Гордеев, А.В. Игнатов, О.Э. Петкун, Л.А. Путинцев, А.А. Чекмарёв. // География и природные ресурсы. – 2016. - №2. — С.175–182.

32. Бураков Д. А. Предвычисление гидрографа весеннего половодья заболоченных рек в южной части лесной зоны Западно-Сибирской низменности / Д. А. Бураков // Метеорология и гидрология. – 1966. – №12, С. 42–46.

33. Бураков Д. А. Условия формирования и математическая модель прогноза ежедневных уровней воды р. Томи у г. Томск за период половодья/ Бураков Д. А., Вершинина И. П. // Климатология и гляциология Сибири: Матер. Междунар. научно–практич. конф. – Томск : Изд–во ЦНТИ, 2012. – С. 53–55.

34. Бураков Д. А. Учет весенних заморозков в математической модели прогноза наводнений в бассейне Енисея. / Д. А. Бураков, А.А. Адамович // Труды VII научной конференции «Современные методы математического моделирования»– Красноярск – 2003. – Т. 1. – С. 14–21.

35. Великанов М. А. Водный баланс суши / М. А. Великанов. – М.: Гидрометеиздат, 1940. –180 с.

36. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование в гидрологии / Ю. Б. Виноградов, Т. А. Виноградова.– М.: Академия, 2010. – 304 с.

37. Вуглинский В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР / В.С. Вуглинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 222 с.

38. Гельфан И. М. Принципы нелокального поиска в системе автоматической оптимизации./ И. М. Гельфан, М. Л. Цейтлин // Доклады АН СССР. 1961.– Т. 137.– №2.

39. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007, 294 с.

40. Жидиков Л. П. Методы расчета и прогноза половодья для каскада водохранилищ и речных систем / Л.П. Жидиков, А.Г. Левин, Н. С. Нечаева, Е. Г. Попов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 129 с.

41. Жоров В. А. Математическая модель трансформации бокового притока и ее использование для расчетов приточности в водохранилища сибирских ГЭС / В.А. Жоров // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 1. – С. 90–97.

42. Жоров В. А. Математические модели и расчеты суточного притока в водохранилища сибирских ГРЭС: автореф. дис. канд. геогр. наук / В. А. Жоров. – Томск, 1985. – 22 с.

43. Жук В. А. Краткосрочный прогноз уровней воды весеннего половодья в бассейне Малой Северной Двины // Сборник "Безопасность энергетических сооружений", выпуск 12. – 2003. – С. 274–282.

44. Игнатов А. В. Оценка полной экспериментальной информации о связи показателей состояния природных объектов. Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем / А. В. Игнатов. – Новосибирск: Наука, 1986. С. 55–60.

45. Игнатов А.В. Руководство пользователя программы “Стохастическое моделирование”. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2019. – 217 с.

46. Калинин Г. П. Приближенный расчёт неустановившегося движения водных масс / Г. П. Калинин, П. И. Милюков // Труды ЦИП. – М.: 1958. – Вып. 66. – 72 с.

47. Калюжный И. Л. Формирование потерь талого стока/ Калюжный И. Л., Павлова К. К. – Л., Гидрометеиздат, 1981, 159 с.

48. Ковзель А. Г. Исследование процессов формирования стока талых вод на малом водосборе / А. Г. Ковзель // Труды ГГИ. – 1953. – Вып. 38 (92).

49. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР / В. Д. Комаров. – М.: Гидрометеиздат, 1959. – 295 с.

50. Комаров В. Д. Исследование влияния глубины промерзания почвы и других факторов на талый сток рек степной и лесостепной зон / В. Д. Комаров, Т. Т. Макарова // Метеорология и гидрология. – 1972. – № 8.– С. 67–74.

51. Корень В. И. Математические модели в прогнозах речного стока / В. И. Корень.– Л.: Гидрометеиздат, 1991, – 198 с.

52. Корень В. И. Математические модели в прогнозах речного стока / В. И. Корень. – Л.: Гидрометеиздат, 1994. – 200 с.

53. Кузьмин П. П. Интенсивность снеготаяния в условиях лиственного леса / П. П. Кузьмин // Труды ГГИ. – Л., 1956. – № 55 (109).

54. Кузьмин П. П. Процесс таяния снежного покрова / П. П. Кузьмин. – М.: Гидрометеиздат, 1961. – 344 с.

55. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат. 1972 191 с.
56. Кучмент Л. С. Модели процессов формирования речного стока / Л. С. Кучмент.– Л., Гидрометеиздат, 1980. – 143 с.
57. Кучмент Л. С. Модель формирования стока на водосборах зоны многолетней мерзлоты (на примере верхней Колымы)/ Л. С. Кучмент, А. Н. Гельфан, В.Н. Демидов // Водные ресурсы, 2000.– № 27(4). – С. 435–444.
58. Линслей Р.К. Прикладная гидрология/ Р.К. Линслей, М.А. Колер, Д.Х. Паулюс.– Л., Гидрометеиздат, 1962. – 759 с
59. Литвинова О. С. Условия формирования и прогнозы весеннего половодья на реках южнотаежного, лесостепного и степного междуречья Оби и Иртыша: автореф. дис. канд. геогр. наук / О.С. Литвинова. – Иркутск, 2011. – С.17–19.
60. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. I. Прогнозы режима вод суши.– Л.: Гидрометеиздат, 1962.– 198 с.
61. Нежиховский Р. А. Методы подсчёта притока воды в водохранилище (критический обзор и предложения). / Нежиховский Р.А. // Труды ГГИ, 1972. – вып.197. – С. 102–111.
62. Нежиховский Р. А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ / Нежиховский Р.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – с. 192.
63. Огиевский А.В. Бассейны-индикаторы // Труды НИУ ГУГМС. 1947. - Сер. 4. - Вып. 26. – 283 с.
64. Ольдекоп, Э. М. Зависимость режима р. Чирчик от метеорологических факторов / Э. М. Ольдекоп // Материалы по вопросу зависимости режима Туркестанских рек от метеорологических факторов. – 1918. – Вып. 1. – С. 15–27.
65. Паршин В.Н. Территориально общий метод прогноза стока основа гидрологического обслуживания сельского хозяйства // Метеорология и гидрология. - 1965,- № 12.-С. 3-10.

66. Петенков А. В. Гидрологические основы водопользования ресурсами малых рек бассейнов Верхнего Енисея, Верхнего Чулыма и Нижней Ангары / А.В. Петенков. – Красноярск: СибНИИГМИ. 1990. – С. 100.

67. Попов Е. Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока / Е. Г. Попов. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 395 с.

68. Попов Е. Г. О возможности определения средних характеристик поглощения воды в речных бассейнах / Е. Г. Попов // Метеорология и гидрология. – М.– 1952.– №4.

69. Попов Е. Г. Гидрологические прогнозы / Е.Г. Попов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 56–60.

70. Почвенно-географическое районирование: Национальный атлас России. Т. 2: Природа и экология / глав. ред. тома В.М. Котляков. – М.: ФГУП «РОСГИСЦЕНТР», 2007. 1:15 000 000. – С. 304–307.

71. Прогноз качества воды в водохранилище и в нижнем бьефе Богучанской ГЭС. – Красноярск-Хабаровск: ИЛ СО РАН-ИВЭП ДВО РАН, 2009. – 178 с.

72. Правила технической эксплуатации и благоустройства водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутское (и озеро Байкал), Братское, Усть-Илимское) / ОАО Ленгидропроект, г. Санкт-Петербург 2014 г.

73. Путинцев Л. А. Методика долгосрочного прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС на р. Ангаре / Л.А. Путинцев // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2015. – № 398. – С. 243–250.

74. Путинцев Л. А. Методика прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС / Л.А. Путинцев // Тезисы стендовых докладов научно–практической школы–семинара молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии.– Новосибирск, 2012. – С. 12–13.

75. Путинцев Л. А. Обеспечение безопасной работы Богучанской ГЭС на основе прогнозов притока воды в Богучанское водохранилище / Л.А. Путинцев // 2nd International Scientific Conference “Applied Sciences and technologies in the

United States and Europe: common challenges and scientific findings”. – New York, 2013. – С. 5–7.

76. Разработка на основе математической модели методов и программного обеспечения долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды для Средней Оби, Енисея с притоками, р. Бирюсы и р. Лены (включая уровни воды заторного происхождения), и краткосрочных прогнозов ежедневных уровней воды рек Селенга и Онон (заключительный) / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Среднесибирское УГМС, Западно-Сибирское УГМС, Обь-Иртышское УГМС; рук. Бураков Д. А.; исполн.: Космакова В. Ф. [и др.]. – Новосибирск, Санкт–Петербург, Красноярск, Томск, 2013. – 112 с. – УДК 556.5.048. – №ГР01201178224.

77. Раковская Э. М. Физическая география России / Э.М. Раковская, М.И. Давыдова– М.: Владос, 2001. – С. 174.

78. РД 52.27.759-2011 Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада ЛТД, 2011. – С. 49–51.

79. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 2. Ангара / под ред. В.Г. Симова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 224 с.

80. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 224 с.

81. Романова В. В. О потерях воды на инфильтрацию в подзолистые почвы и черноземы / В. В. Романова, К. К. Павлов, И. Л. Калюжный. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – № 214. – С. 106–122.

82. Рождественский А. В. Статистические методы в гидрологии / А. В. Рождественский, А. И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974 – 424 с.



83. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ / под ред. Е.Г. Попова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 357 с.
84. Самнер, Г. Математика для географов / Г. Самнер. – М. «Прогресс», 1981. – 296 с
85. Службы мониторинга заснеженности [Электронный ресурс]. – URL: <http://space.akadem.ru/snow/> – Загл. с экрана (дата обращения: 20.01.2022)
86. Субботин А.И Исследование просачивания воды в талую и мерзлую почву / А.И. Субботин В.С. Дыгало // Труды ЦИП. 1963. – № 117. – С 130–179.
87. Шатунова Е. А. Метод расчета ежедневного притока воды к створу Богучанской ГЭС на Ангаре для целей прогноза / Е.А. Шатунова. – Красноярск: Госкомгидромет СССР, 1982. – С. 20–28.
88. Burakov D.A. Longterm Forecasting of Snowmelt Runoff. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) / D.A. Burakov // Hydrological systems modeling, 2011. – Vol. I., 102–136 P.
89. Crawford N. H. A conceptual model of hydrologic cycle / N.H. Crawford, R. K. Linsley. – Intern. Assn. of Scientific Hydrology, Publ., 63. 1963.
90. Field, C.B Technical Summary / Field, C.B; Barros, V.R.; Mach, K.J.; Mastrandrea, M.D.; van Aalst, M.; Adger, W.N.; Arent, D.J.; Barnett, J.; Betts, R. // IPCC AR5 WG2 A, 2014. — 2014. — С. 35—94.
91. IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, Bex V., Midgley P.M.] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
92. Motovilov, Y., ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region / Y. Motovilov, L. Gottschalk, K. Engeland, A. Belokurov // Institute Report Series. – № 105, May 1999.

93. Riggs G. MODIS Snow Products User Guide to Collection / G. Riggs , D. Hall , V. Salomonson.– 5.November2006, –P. 1–80. DOI: <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sugc5.pdf> .
94. Rosenbrock H. H., "An automatic method for finding the greatest or least value of a function", Computer Journal 3 (1960), 175-184
95. Semenova O. Barriers to progress in distributed hydrological modeling/ O. Semenova, K. Beven // Hydrological Processes. – № 29. – 2015. – P. 2074–2078.
96. Parajka, J., Andréassian, V., Archfield, S., Bárdossy, A., Blöschl, G., Chiew, F., Zhang, Y. (2013). Prediction of runoff hydrographs in ungauged basins. In G. Blöschl, M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, & H. Savenije (Eds.), *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales* (pp. 227-269). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139235761.013
97. Yong-Keun Lee «An In-Depth Evaluation of Heritage Algorithms for Snow Cover and Snow Depth Using AMSR-E and AMSR2 Measurements»/ Yong-Keun Lee, C. Kongoli, J. Key // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – Vol. 33. – №4, April 2016, – P. 2319–2336.
98. Zakharova, E. A. Variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry (2014) / E. A. Zakharova, , A. V. Kouraev, F. Rémy, V. A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Seasonal Journal of Hydrology, – № 512, – P. 366–378. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.002>.
99. Zotov L., Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE. In book: *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances* / L. Zotov, C. Shum, N. Frolova // Springer Geophysics. – 2015. – P. 45–59.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Результаты расчета бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал

Таблица А.1 – Расчет бокового притока по уравнению 3.2

годы	Фактический боковой приток за 2 квартал (м <sup>3</sup> /с)	Боковой приток за 2 квартал, рассчитанный по уравнению 3.2 $S/\sigma = 0,370$	Ошибка
1980	506	525	-19
1981	423	452	-29
1982	573	542	31
1983	822	753	69
1984	504	558	-54
1985	612	603	9
1986	377	375	2
1987	249	262	-13
1988	509	618	<b>-109</b>
1989	537	478	59
1990	392	386	6
1991	399	399	0
1992	455	457	-2
1993	244	249	-5
1994	577	570	7
1995	512	519	-7
1996	477	529	-52
1997	574	622	-48
1998	469	409	60
1999	674	652	22
2000	682	595	87
2001	611	634	-23
2002	707	644	63
2003	432	442	-10
2004	632	647	-15
2005	545	618	-73
2006	565	567	-2
2007	668	757	-89
2008	445	419	26
2009	693	670	23
2010	523	477	46
2011	409	324	85
2012	368	397	-29

Примечание: Ошибки прогноза, превышающие допустимую ошибку (90 м<sup>3</sup>/с), выделены полужирным курсивом.

Таблица А.2 – Расчет бокового притока по уравнению 3.3

Год	Фактический боковой приток за 2 квартал (м <sup>3</sup> /с)	Боковой приток за 2 квартал, рассчитанный по уравнению 3.3 (м <sup>3</sup> /с) $S/\sigma = 0,407$	Ошибка
1980	535	483	52
1981	439	455	-16
1982	593	512	81
1983	847	890	-43
1984	527	511	16
1985	590	552	38
1986	377	389	-12
1987	239	355	<b>-116</b>
1988	517	585	-68
1989	569	517	52
1990	396	347	49
1991	367	419	-52
1992	413	474	-61
1993	254	271	-17
1994	629	616	13
1995	542	494	48
1996	497	521	-24
1997	584	571	13
1998	489	426	63
1999	654	603	51
2000	689	582	<b>107</b>
2001	637	610	27
2002	679	624	55
2003	431	438	-7
2004	639	630	9
2005	575	516	59
2006	595	618	-23
2007	677	805	<b>-128</b>
2008	464	483	-19
2009	717	702	15
2010	508	513	-5
2011	458	371	87
2012	380	368	12

Примечание: Ошибки прогноза, превышающие допустимую ошибку (90 м<sup>3</sup>/с), выделены полужирным курсивом.

Таблица А.3 – Расчет бокового притока с применением инфильтрационно-емкостной модели

Год	Фактический боковой приток за 2 квартал ( $\text{м}^3/\text{с}$ )	Расчёт бокового притока за 2 квартал с применением инфильтрационно-емкостной модели ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) $S/\sigma = 0,388$	Ошибка
1980	506	538	-32
1981	423	477	-54
1982	573	550	23
1983	822	722	<b>100</b>
1984	504	564	-60
1985	612	603	9
1986	377	416	-39
1987	249	256	-7
1988	509	612	<b>-103</b>
1989	537	499	38
1990	392	421	-29
1991	399	406	-7
1992	455	479	-24
1993	244	160	84
1994	577	568	9
1995	512	515	-3
1996	477	537	-60
1997	574	631	-57
1998	469	425	44
1999	674	641	33
2000	682	593	89
2001	611	625	-14
2002	707	631	76
2003	432	469	-37
2004	632	628	4
2005	545	629	-84
2006	565	571	-6
2007	668	720	-52
2008	445	443	2
2009	693	664	29
2010	523	495	28
2011	409	356	53
2012	368	415	-47

Примечание: Ошибки прогноза, превышающие допустимую ошибку ( $90 \text{ м}^3/\text{с}$ ), выделены полужирным курсивом.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Моделирование гидрометеорологических характеристик в Богучанском водохранилище за второй квартал

Бассейн Богучанского водохранилища, 1 высотная зона, высота 210 м., 2002 г.  
(многоводный)

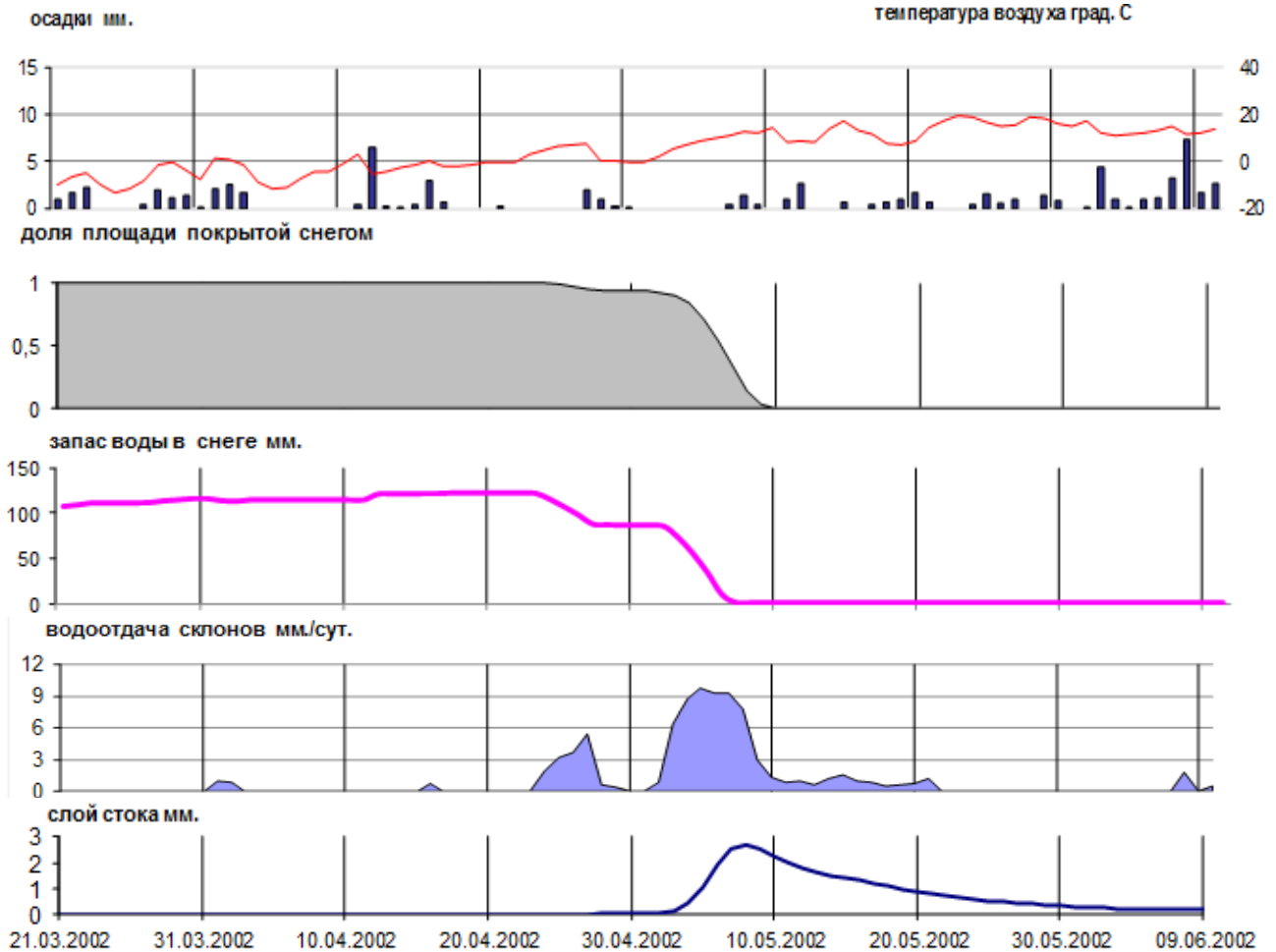


Рисунок Б.1 – Богучанское водохранилище в первой высотной зоне

Ежедневные изменения осадков ( $X$ ), температуры воздуха ( $T$ ), доли площади бассейна покрытой снегом ( $F$ ), запаса воды в снеге ( $S_{\text{ост}}$ ), водоотдачи склонов ( $U_{\text{водот}}$ ), слой стока ( $h$ )

**Бассейн Богучанского водохранилища, 2 высотная зона, высота 350 м., 2002 г.  
(многоводный)**

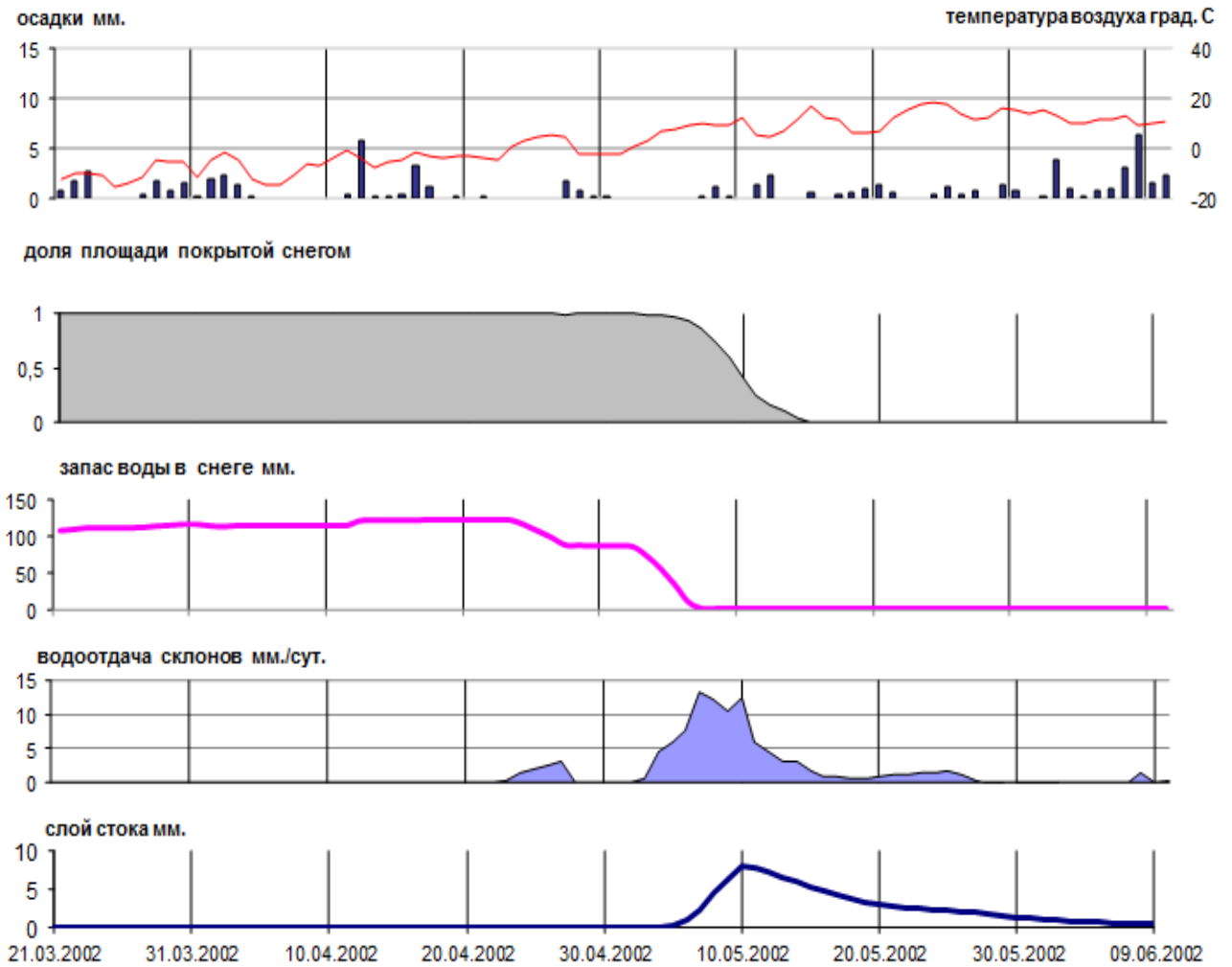


Рисунок Б.1 – Богучанское водохранилище во второй высотной зоне

**Бассейн Богучанского водохранилища, 3 высотная зона, высота 450 м., 2002 г.  
(многоводный)**

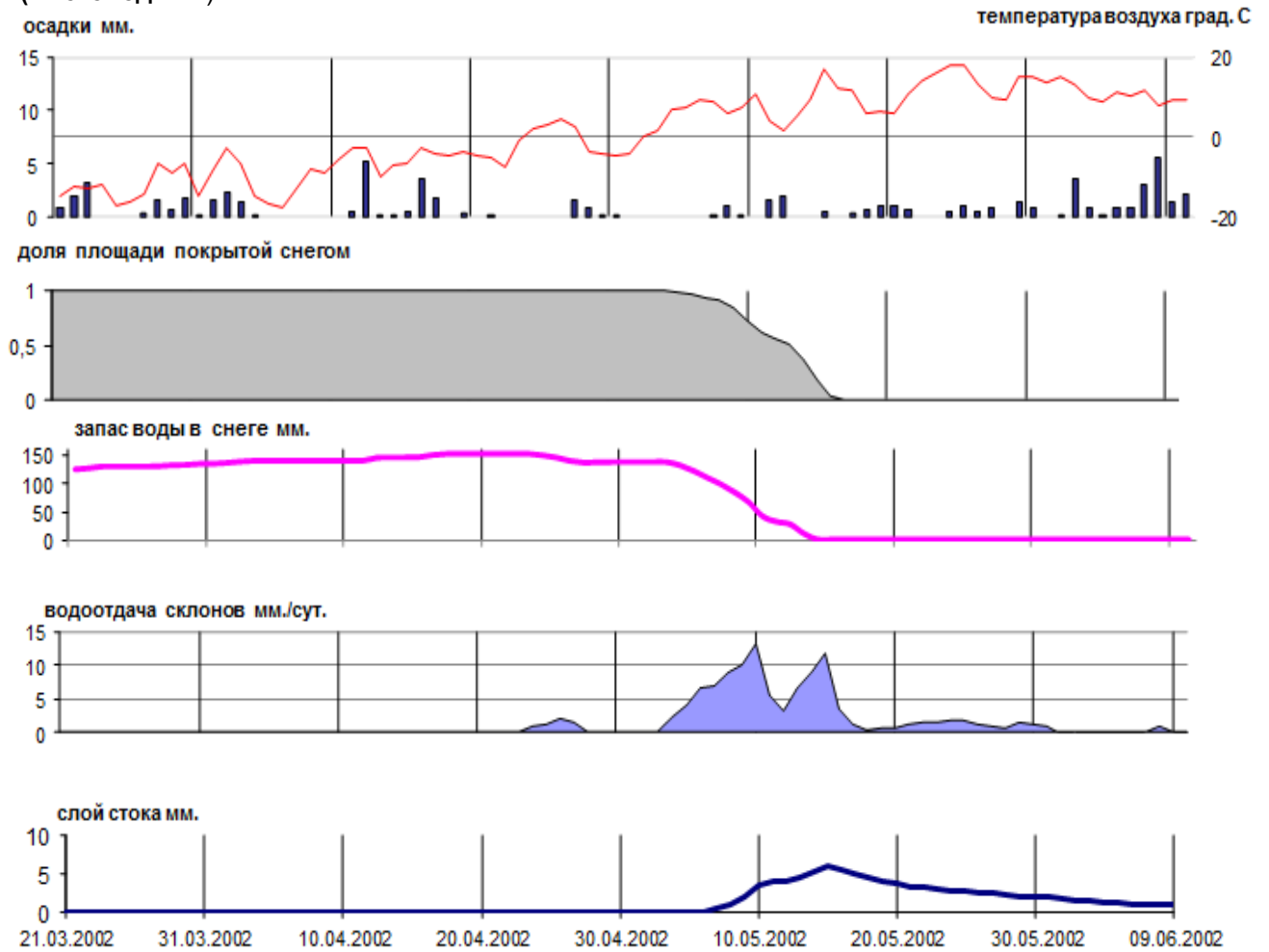


Рисунок В.3 – Богучанское водохранилище в третьей высотной зоне



**Бассейн Богучанского водохранилища, 4 высотная зона, высота 550 м., 2002 г.  
(многоводный)**

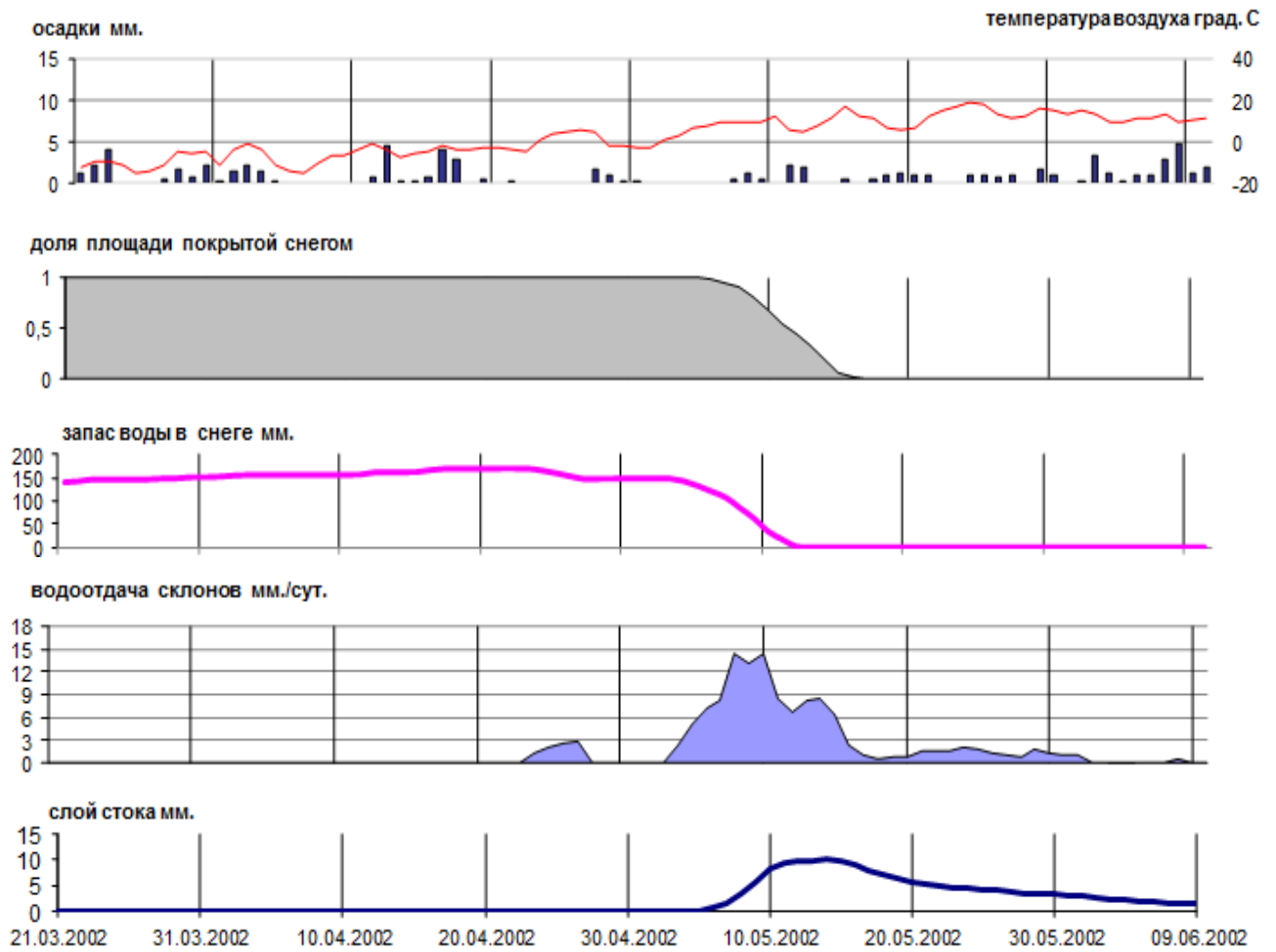


Рисунок В.4 – Богучанское водохранилище в четвертой высотной зоне

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Оценки относительной заснеженности бассейна Богучанского водохранилища по данным космического мониторинга

Таблица В.1 – Оценки относительной заснеженности всего бассейна и высотных зон Богучанского водохранилища при доле облачности менее 30 % за 2005—2017 гг.

Дата	Заснеженность и номера высотных зон				
	весь бассейн	(1) 210–300 м	(2) 300–400 м	(3) 400–500 м	(4) >500 м
1	2	3	4	5	6
<b>2005 год</b>					
4 фев.	99,9	99,8	99,9	99,9	100
19 мар.	75,5	82,7	73,6	69,2	73,5
5 апр.	73,3	81,4	69,7	68,2	73,4
6 апр.	52,7	63,2	49,5	43,2	45,5
15 апр.	47,8	48,1	45,4	50,7	57,4
22 апр.	41	40,7	42	38,2	41,2
24 апр.	17,3	9,9	17,7	25,5	30,4
8 мая	6,4	2,4	5,5	13,8	10,9
17 мая	0,1	0	0	0	1,4
<b>2006 год</b>					
23 фев.	98,3	96,9	98,7	98,3	99,2
23 мар.	76,4	82,4	71,6	76,8	89,9
29 апр.	71,7	84	67,8	61	62,4
17 мая	4,2	0,7	2,1	13,9	20,4
25 мая	0	0	0	0	0
<b>2007 год</b>					
19 янв.	98,9	98,3	99	99,3	99,5
12 мар.	92,5	94,2	91,5	91,7	93,3
6 апр.	72,2	83	69,4	64,3	63
11 апр.	70,1	80,2	67,8	61,2	59,9
12 апр.	54,7	63,4	52,8	48,4	47,9
19 апр.	54,8	59,7	55,5	49,1	48
21 апр.	48,7	50	49,2	46,6	39,9
27 апр.	15,4	5,6	15,8	39	39
14 мая	0	0	0	0	0
<b>2008 год</b>					
6 фев.	97,5	95,6	97,6	99,5	100
28 мар.	69	77,6	66,6	59	55,1
31 мар.	62,7	68,9	63,6	57,5	53
12 апр.	62,2	67,7	58,7	59,2	66,5
13 апр.	77,9	84,4	75,4	72,5	78,8
14 апр.	67,2	74,4	65,5	61,4	52

24 апр.	68,6	70,9	68,8	65,4	64,7
28 апр.	36	28,1	38,9	42,1	37,5
5 мая	8,8	3,9	8,4	18,2	30,5
10 мая	2,8	1,4	1,6	8,2	7,9
19 мая	0	0	0	0	0
<b>2009 год</b>					
4 фев.	96,7	96,2	97,5	97,3	90,5
24 мар.	76,4	87,3	75,7	67,4	62,2
31 мар.	73,1	81,1	71,7	63,8	53,4
1 апр.	62,1	68,9	61	53,7	40,9
6 апр.	53,8	53,3	54,4	54,3	51,1
12 апр.	50,2	52,7	51,1	47,1	44,1
13 апр.	50,9	51	51,2	49,7	49,5
15 апр.	44,8	46,7	45,7	41,7	40,4
22 апр.	41,9	18,9	40,7	62,3	77,8
24 апр.	20,1	7,1	19	38,4	38,5
31 мая	0	0	0	0	0
<b>2010 год</b>					
7 янв.	97	93,5	97,5	99,3	99,5
27 мар.	65,2	71,2	63,6	62,4	59,7
16 апр.	62,4	66,4	61,3	59,4	57,3
20 апр.	39,7	40,7	37,8	43,2	41,9
29 апр.	23,7	13,3	24,6	37,9	31,4
8 июн.	0	0	0	0	0
<b>2011 год</b>					
20 янв.	99,6	98,9	99,7	100	100
7 мар.	82,9	88,6	80,9	80,3	80,5
22 мар.	80,2	86,9	77,0	78,4	81,2
28 апр.	2,41	0,63	0,2	9,46	45,0
13 мая	0,03	0	0	0	0,36
<b>2012 год</b>					
9 янв.	97,2	95,1	96,9	98,6	99,8
21 фев.	79,6	74,7	79,4	85,5	84,9
16 мар.	51,1	56,1	50,9	46,7	40,7
3 апр.	45,4	43,3	44,6	49,9	50,4
4 мая	5,1	1,4	4,2	9,9	9,5
5 июн.	0	0	0	0	0
<b>2013 год</b>					
22 фев.	46,9	42	47,5	50,1	52,2
21 мар.	46,1	40,2	47,7	51,1	52,6
27 мар.	39,1	39,2	37,6	41,2	43,6
14 апр.	48,4	54,0	49,0	42,9	37,3
17 апр.	41,8	40,2	43,1	41,7	39,1
29 апр.	17,9	12,2	16,2	25,6	25

6 мая	1,1	2,6	0	0,3	4,9
10 мая	1,4	4,5	0	0	0,3
13 мая	0,8	2,8	0	0	0
<b>2014 год</b>					
20 мар.	92,5	96,7	92,3	89,9	83,6
1 апр.	85,4	90,7	84,4	82,9	73,9
10 апр.	71,8	72,1	71,4	73,3	68,8
15 апр.	49,4	39,9	48,3	61,5	63,2
15 мая	0,62	2,18	0	0	0
<b>2015 год</b>					
22 фев.	98,9	98,5	98,6	99,7	99,8
2 апр.	97,8	98,3	97,4	98,4	96,6
8 мая	10,2	5,64	8,59	17,6	24,9
9 мая	1,74	5,72	0	0	0
<b>2016 год</b>					
27 фев.	99,9	99,7	100	100	100
21 мар.	90,3	94,5	89,7	87,1	83,8
4 апр.	93,1	96,1	91,9	91,9	90,8
9 апр.	87,1	92,7	85,7	83,0	82,3
31 мая	0	0	0	0	0
<b>2017 год</b>					
27 фев.	99,8	99,6	99,8	100	100
22 мар.	88,8	94,5	87,8	84,1	79,7
25 апр.	45,6	36,9	46,6	51,1	60,6
29 апр.	26,5	19,4	23,6	37,5	47,0

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Таблицы коэффициентов парной корреляции

Таблица Г.1 – Коэффициенты парной корреляции переменных в уравнении 3.5

Характеристика	$S_1$	$Q_{ч10-11}$	$\Sigma t_{1max}$	$X_{1(10-3)}$	$t_{n10}$	$T_{12}$
$S_1$	1,00					
$Q_{ч10-11}$	0,08	1,00				
$\Sigma t_{1max}$	-0,11	0,10	1,00			
$X_{1(10-3)}$	0,43	0,23	-0,01	1,00		
$t_{n10}$	-0,39	-0,12	-0,07	-0,14	1,00	
$T_{12}$	0,17	0,07	0,13	0,33	-0,26	1,00

Таблица Г.2 – Коэффициенты парной корреляции переменных в уравнении 3.6

Характеристика	$S_2$	$S_1$	$S_3$	$X_{2(10-3)}$	$\Sigma t_{1max}$	$Q_{M10-11}$
$S_2$	1,00					
$S_1$	0,68	1,00				
$S_3$	0,11	0,02	1,00			
$X_{2(10-3)}$	0,16	0,48	0,09	1,00		
$\Sigma t_{1max}$	-0,09	-0,11	-0,31	-0,26	1,00	
$Q_{M10-11}$	0,09	0,03	-0,10	0,10	0,03	1,00

Таблица Г.3 – Коэффициенты парной корреляции переменных в уравнении 3.7

Характеристика	$S_4$	$X_{10}$	$X_1$	$X_{1(10-3)}$	$S_5$	$\Sigma t_{2max}$
$S_4$	1,00					
$X_{10}$	0,19	1,00				
$X_1$	-0,09	0,07	1,00			
$X_{1(10-3)}$	0,47	0,27	-0,09	1,00		
$S_5$	-0,07	-0,02	0,05	0,15	1,00	
$\Sigma t_{2max}$	-0,21	-0,32	-0,16	0,02	0,05	1,00