

Министерство природных ресурсов и экологии РФ
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
(ФГБУ «СИБНИГМИ»)

УДК 556.5.048
№ госрегистрации 01201178224
Инв. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУ «СибНИГМИ»

Крупчатников В.Н.

« 31 » декабря 2013 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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)

Шифр темы: 1.7.49

Научный руководитель
Д.г.н.

Д.А. Бураков

Новосибирск 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы
д.г.н



Д.А. Бураков

Исполнители темы



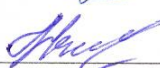
В.Ф. Космакова



И.Н. Гордеев



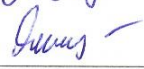
В.Ф. Богданова



Н.П. Волковская



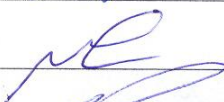
В.В. Алешина



Н.И. Якимова



В.В. Лариошкин



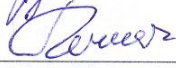
О.И. Иванова



А.Б. Колкер

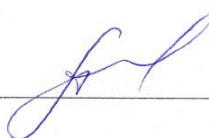


А.В. Гочаков



В.Ю. Ромасько

Нормоконтролер



Т.П. Панькова

РЕФЕРАТ

Отчет 111 с., 21 рис., 54 табл., 16 источников.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ, РУСЛОВАЯ СЕТЬ, РЕЧНАЯ СИСТЕМА, РАСХОД ВОДЫ, ВРЕМЯ ДОБЕГАНИЯ, КРИВАЯ ДОБЕГАНИЯ, ГИДРОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА, КРОМКА ЛЕДОСТАВА, ПОДВИЖКА ЛЬДА, ПОЛЫНЬЯ, ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ

Разработан автоматизированный метод краткосрочного прогноза ежедневных уровней воды на реках Селенга и Онон для 8 пунктов (на р. Онон – с. Верхний Ульхун, с. Бытэв, с. Чиндант, с. Оловянная, с. Чирон; на р. Селенга – с. Новоселенгинск, г. Улан-Удэ, с.Кабанск). Представлены методы и программное обеспечение прогнозов максимальных уровней воды для Средней Оби и Енисея с притоками, на р. Бирюсе и р. Лене по пунктам на территории Иркутской области. Усовершенствованы модели и программное обеспечение прогнозов характеристик весеннего половодья и дождевых паводков на сибирских реках.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Метод прогноза ежедневных уровней воды с применением физико-статистической и концептуальной моделей формирования дождевого стока на реках Онон и Селенга	8
1.1 Краткая ландшафтно-гидрологическая характеристика исследуемых бассейнов	8
1.2 Физико-статистический метод прогноза стока и максимальных уровней воды дождевых паводков	13
1.3 Концептуальная модель формирования и прогноза ежедневных уровней воды дождевых паводков	18
2 Совершенствование пользовательского интерфейса ПО «Капля», реализующего прогнозы ежедневных уровней воды	26
2.1 Постановка задачи	26
2.2 Организация распределённой базы данных	28
2.3 Интеграция с системами сбора данных УГМС	30
2.4 Инструкция по импорту данных для программы «Капля»	34
3 Автоматизированная технология прогноза ежедневных уровней воды с применением концептуальной модели на реках Онон и Селенга	36
3.1 Задание морфометрических характеристик бассейна	36
3.2 Общая схема оптимизации параметров модели прогноза	39
3.3 Результаты проверочных прогнозов ежедневных уровней вод с применением математической модели	41
4 Прогнозы максимальных уровней воды на затороопасных участках рек	46
4.1 Физические основы прогнозов	46
4.2 Прогностические зависимости для прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Западной и Средней Сибири, уровней весеннего половодья на Верхней Лене, Бирюсе	47
4.2.1 р. Подкаменная Тунгуска – пос. Кузьмовка	47
4.2.2 р. Обь – г. Нижневартовск	51
4.2.3 р. Обь – с. Александровское	54
4.2.4 р. Обь – с. Молчаново, с. Белогорье, пос. Октябрьский	56
4.2.5 р. Чулым – с. Копьево	60
4.2.6 р. Чулым – пос. Балахта	63
4.2.7 р. Чулым – с. Зырянское	65
4.2.8 р. Чулым – пгт Батурино	68
4.2.9 р. Кан – г. Канск	71
4.2.10 р. Кеть – пос. Максимкин Яр	73
4.2.11 р. Лена – г. Усть-Кут	75
4.2.12 р. Лены – с. Змеиново	80
4.2.13 р. Лена – пгт Жигалово	82
4.2.14 р. Бирюса – г. Бирюсинск	83
4.2.15 р. Бирюса – пгт Шиткино	87
4.3 О сложившейся практике борьбы с наводнениями, обусловленными заторами льда на реках России, посредством взрывных работ	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А	98

ВВЕДЕНИЕ

Отчет посвящен разработке методов прогноза максимальных уровней весеннего половодья рек Оби, Енисея и Верхней Лены, а также разработке методов прогноза ежедневных уровней воды рек Забайкалья с паводочным режимом (Селенга и Онон).

Д.А. Бураков (дгн., профессор, ответственный исполнитель темы НИР, ФГБУ «СибНИГМИ», ФГБУ «Среднесибирское УГМС») осуществлял научное руководство НИР, выполнял разработку метода прогноза, математическую модель стока, разработку программного обеспечения прогноза, оптимизацию параметров моделей, численные эксперименты, заключительный отчет. В.Ф. Космакова, И.Н. Гордеев (ФГБУ «СибНИГМИ», ФГБУ «Среднесибирское УГМС») разработали физико-статистические зависимости для прогноза максимальных уровней воды, включая заторные. В.Ф. Богданова (ответственный исполнитель темы от ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС») и сотрудники отдела гидрологических прогнозов ГМЦ ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» подготовили электронный архив данных по бассейну Оби; материалы об условиях формирования максимальных уровней воды, проверили прогнозные формулы. Н.П. Волковская (ответственный исполнитель от ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС») и сотрудники отдела гидрологических прогнозов ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» подготовили электронный архив данных по бассейну Нижнего Иртыша, Средней и Нижней Оби, материалы об условиях формирования максимальных уровней воды, испытали методику прогноза. В.В. Алешина (ответственный исполнитель темы от ФГБУ «Забайкальское УГМС») и сотрудники группы гидрологических прогнозов ФГБУ «Забайкальское УГМС» с участием Службы автоматизированной передачи данных подготовили электронный архив данных по бассейнам рек Селенга и Онон, материалы об условиях формирования дождевых паводков. Организовали систему подготовки и импорта данных и интерфейса их корректировки на ПК, испытали методику прогноза. Н.И. Якимова (ответственный исполнитель от ФГБУ «Иркутское УГМС») и сотрудники группы гидрологических прогнозов ФГБУ «Иркутское УГМС» подготовили электронный архив данных по бассейну Верхней Лены и Бирюсы, материалы об условиях формирования максимальных уровней воды, испытали методику прогноза. В.В. Лариошкин, О.И. Иванова (ФГБУ «СибНИГМИ», ФГБУ «Среднесибирское УГМС») исследовали взаимосвязи факторов стока паводков, провели оптимизацию параметров моделей и численные эксперименты, сформировали файлы БД программного обеспечения прогнозов. А.Б. Колкер (зав. лабораторией ИДиТ ФГБУ «СибНИГМИ»), А.В. Гочаков (зав. группы ТП ОИНиТ ФГБУ «СибНИГМИ») разработали программное обеспечение, реализующее передачу гидрометеорологической

информации для пользовательского интерфейса ПО «Капля». В.Ю. Ромасько (ФГБУ «СибНИГМИ», Главное управление МЧС России по Красноярскому краю) разрабатывал программное обеспечение интерфейса ПО «Капля». Осуществлял прием и обработку информации со спутников Терра для бассейнов рек Селенга и Онон.

В Сибири экстремально высокий сток весенних половодий вызывается сочетанием следующих условий: дождливая осень, суровая зима, большое снегонакопление, запоздавшая холодная весна (или же ранняя весна, но очень дружная) с большим количеством осадков, резкое установление теплой погоды. В этом случае наводнения могут формироваться в результате интенсивного притока талых и дождевых вод. На сибирских реках, текущих в субмеридиональном направлении, увеличивается вероятность образования заторов льда. Вследствие более раннего наступления весны на юге, волна паводка, перемещаясь на север, взламывает прочный ледовый покров. Нередко заторы льда образуются на одних и тех же участках рек, что связано с геоморфологическими особенностями строения речного русла: наличием крутых излучин, островов, сужений, порогов.

Степень влияния каждого из перечисленных факторов формирования половодья изменяется по территории и во времени. Например, в одних случаях наводнения в основном связаны с накоплением в течение продолжительной сибирской зимы исключительно больших запасов воды в снежном покрове (при относительно меньшем влиянии других факторов). В других случаях определяющее влияние оказывает выпадение обильных осадков в период снеготаяния, или необычайно высокое предзимнее увлажнение бассейна, которое в сочетании с глубоким промерзанием почвы делает ее водонепроницаемой. Наконец, если совмещаются факторы, благоприятные высокой водности и образованию заторов льда, наблюдаются наводнения, попадающие в разряд катастрофических.

В пределах рассматриваемой территории наиболее ярко выражены наводнения дождевого происхождения на реках южной части бассейна р. Ангары (рр. Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия и др.) и в Забайкалье (рр. Селенга, Онон и др.). Здесь сток дождевых паводков в теплый период года систематически превышает сток весеннего половодья. Например, в июле 1984 году дождевой паводок на реке Ия сформировал у г. Тулун наибольший за многолетний период максимальный уровень воды (1132 см), вызвав катастрофическое наводнение. Этот горизонт можно назвать историческим. Подъем уровня над минимальным меженным составил около 10 м.

По обеспеченности максимальных уровней воды мы выделяем: исторические наводнения обеспеченностью менее 0,1%, катастрофические от 0,1 до 1 %, выдающиеся – от 1 до 10 %, и высокие – от 10 до 25 %.

В отчете представлены усовершенствованные методики долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для рек бассейна Средней Оби, Енисея с притоками, а также верхней Лены и Бирюсы (включая максимальные уровни воды заторного происхождения). Эта задача решается для ФГБУ «Обь - Иртышское УГМС», ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», ФГБУ «Среднесибирское УГМС» и ФГБУ «Иркутское УГМС».

Другая цель настоящего исследования состоит в построении концептуальной модели формирования и краткосрочного прогноза стока дождевых паводков на трансграничных реках Онон и Селенга (ФГБУ «Забайкальское УГМС») с применением доступной информации о ежедневных осадках и уровнях воды в российской части их бассейнов.

Важной составляющей технологической линии гидрологических прогнозов дождевых паводков, помимо методики и программного обеспечения собственно прогнозов, является передача данных от сервера УГМС на компьютер отдела гидропрогнозов в требуемом формате. Действительно, при отсутствии автоматизации оператору программы требуется для каждого бассейна ввести данные с одного-трёх десятков станций. В этом случае гидропрогнозист только тем и занят, что вводит данные – сам расчёт делается быстро. Таким образом, цель исследования также состоит в том, чтобы избавить гидропрогнозиста ФГБУ «Забайкальское УГМС» от рутинного ввода числовых данных, и при этом за ним сохранить возможность их контроля и коррекции.

1 Метод прогноза ежедневных уровней воды с применением физико-статистической и концептуальной моделей формирования дождевого стока на реках Онон и Селенга

1.1 Краткая ландшафтно-гидрологическая характеристика исследуемых бассейнов

Гидрография, рельеф и геологическое строение. Длина р. Онон 1032 км, площадь водосбора 96200 км² (рисунок 1.1). В верховьях на протяжении 298 км он течет по Монголии. Водосбор монгольской части реки составляет почти 45000 км² (46 от площади всего рассматриваемого бассейна). Сливаясь с рекой Ингода, Онон образует реку Шилка, которая, сливаясь с рекой Аргунь, образует собственно Амур.

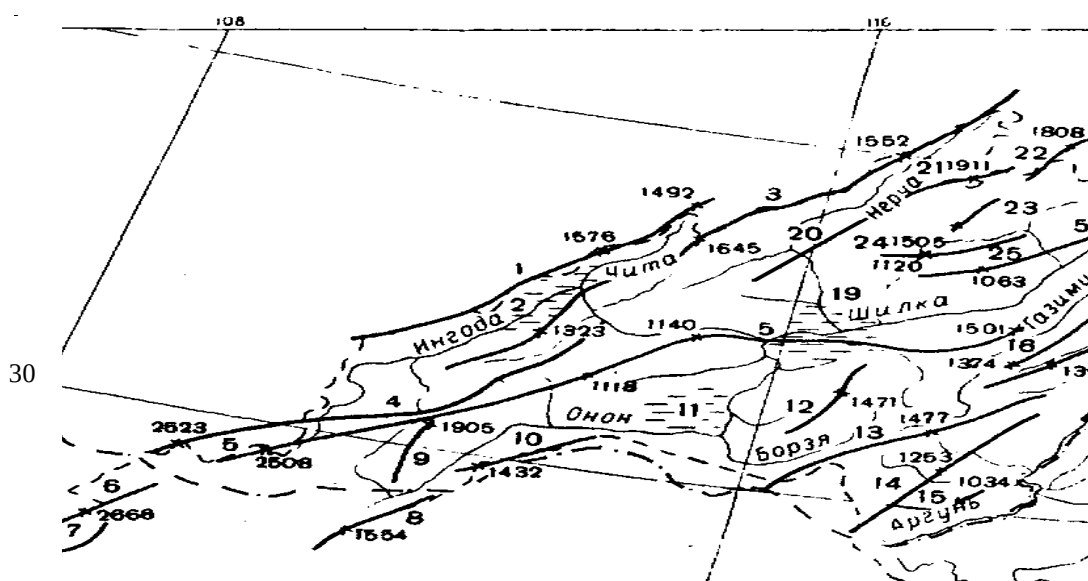


Рисунок 1.1 - Орографическая схема бассейна р. Онон (ФГБУ «Забайкальское УГМС»)

1 — Яблочный хребет; 2 — Ингоднская котловина; 3 — хр. Черского; 4 — Даурский хребет; 5 — Борщовочный хребет; 6 — нагорье Хэнтэй; 7 — горы Барха-Даба; 8 — горы Эрэн-Дабан; 9 — Ононский хребет; 10 — хр. Эрмана; 11 — Приононская равнина; 12 — хр. Кукульбей; 13 — Нерчинский хребет; 14 — Кличкинский хребет; 15 — Аргунский хребет; 16 — Газимурский хребет; 17 — Урюмканский хребет; 18 — Нижне-Аргунский хребет; 19 — Нерчинская котловина; 20 — Нерчяно-Куэнгинский хребет; 21 — Муройский хребет; 22 — Тунгирский хребет; 23 — Хорьковский хребет; 24 — Алеурский хребет; 25 — Шилкинский хребет.

Река Селенга образуется в Монголии слиянием рек Идэр и Мурэн. Впадает в озеро Байкал, образуя обширную дельту (рисунок 1.2). На Селенгу приходится приблизительно половина речных вод, поступающих в Байкал. Длина Селенги от истока р. Идэр 1024 км, в том числе 415 км верхнего течения в Монголии, 409 км нижнего течения в России. Общая площадь бассейна Селенги составляет 447060 км², из них 281000 км² (63, или почти 2/3) находится в Монголии и 166060 км², (37) в пределах РФ. На территории Монголии формируется объем стока в среднем 14,0 - 15,0 км³ в год, составляющий 45 - 50 суммарного стока Селенги, поступающего в озеро Байкал.

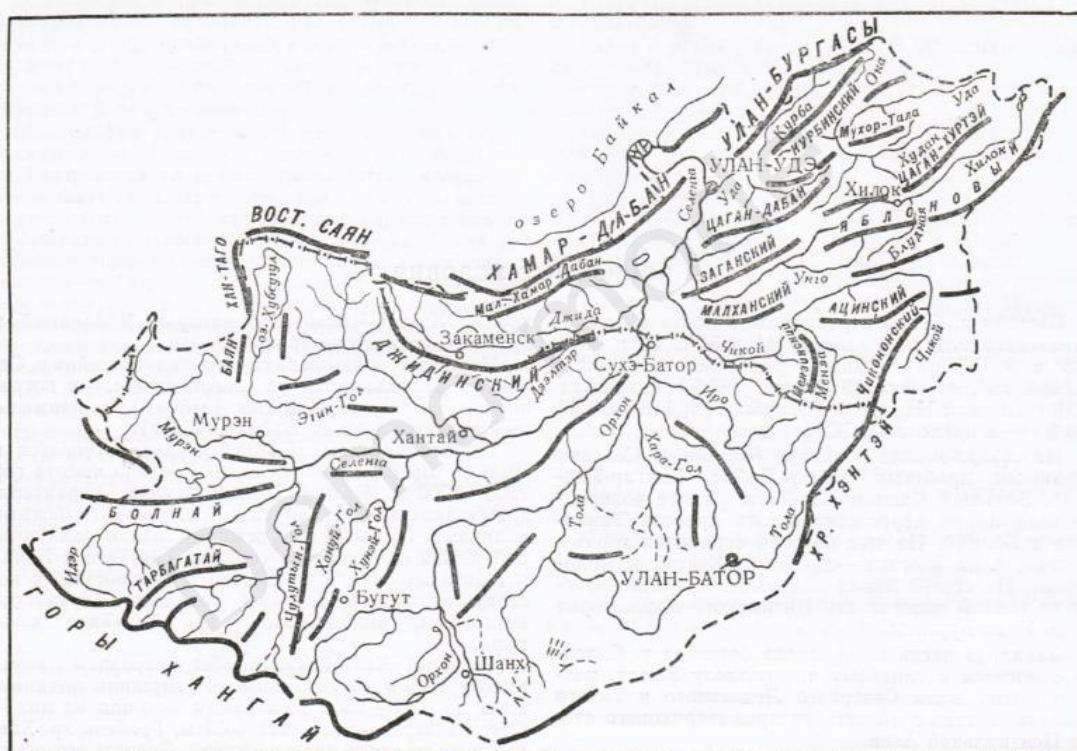


Рисунок 1.2 - Орографическая схема бассейна р. Селенги
(ФГБУ «Забайкальское УГМС»)

Основными элементами рельефа рассматриваемых бассейнов являются горные хребты, слаборасчлененные плато, межгорные впадины, котловины, всхолмленные участки и равнины. Средняя высота 600 - 700 м.

Горные хребты в бассейне р. Онон имеют мягкие очертания с высотами от 1000 до 1500 м над уровнем моря, располагаются примерно параллельно друг другу и простираются с юго-запада на северо-восток. Господствующее положение занимают Даурский и Борщевочный хребты, протянувшиеся через всю рассматриваемую территорию от верховий Онона до места слияния рек Шилки и Аргуни. Наиболее высокая часть до 2500 м расположена на крайнем западе бассейна р. Онон.

На территории России водосбор р. Селенги находится в пределах Селенгинской Даурии, которая разделена хребтами (основными являются Хамар-Дабан и Улан-Бургасы). На западе и востоке бассейн ограничен Восточно-Саянскими горами и Яблоновым хребтом соответственно. По условиям рельефа бассейн р. Селенги делится на восточную, центральную и западную части.

Восточная часть представляет собой средневысотные горы, с густой гидрографической сетью притоков Селенги (Уда, Хилок, Чикой). Долины рек, местами, имеют вид каньонов, но в большинстве своем хорошо разработаны с террасированными и

заболоченными плоскими днищами. Приводораздельные пространства представлены широкими хребтами и отрогами.

Центральная часть имеет холмистый рельеф с наличием равнинных пространств, часто приуроченных к широким долинам рек с наличием оврагов и балок. По левобережью р. Джиды и в долине р. Уды встречаются эоловые дюны.

Западная часть охватывает бассейны левобережных притоков рр. Селенга, Темник и Джиды. Восточно-Саянское нагорье, образуя изгиб, разделяется на ряд горных хребтов (высота до 2000 - 2500 м), имеющих крутые склоны с глубокими долинами каньоно- и V-образного профиля, изрезанные многочисленными притоками рек Джиды и Темника.

Горные хребты сложены преимущественно сильно дислоцированными сланцами, сиенитами и гнейсами. Межгорные впадины заполнены песчаниками и глинами, перекрытыми аллювиальными и делювиальными отложениями. Густота речной сети в бассейнах Селенги и Онона составляет в среднем 0,55 км/км². Наименьшей густотой характеризуется Онон – Борзинская степь, где господствуют бессточные и полубессточные области (сток только в периоды дождей). В пределах Агинского и Ононского районов, от с. Кубухай до устья р. Борзя, р. Онон течет по бессточной равнине, не принимая даже временных водотоков. Лесистость бассейнов в среднем составляет 40. Преобладают горные лиственничные и лиственнично-таежные леса. Почвы степных районов – каштановые с вкраплениями черноземов. Произрастает злаковое разнотравье.

Климат территории континентальный. Зимой она располагается в зоне влияния мощного отрога Сибирского антициклона, в котором происходит формирование холодного континентального воздуха. Зима холодная, продолжительная и исключительно малоснежная. Лето теплое, короткое. Для летнего периода характерна циклоническая деятельность. Годовое количество осадков изменяется от 600 мм в горно-таежной части бассейна до 200 - 300 мм в сухостепных районах. Основная часть осадков выпадает в период летних муссонов. Наибольшее количество влаги на территорию бассейна р. Селенги приносят воздушные массы, приходящие с юго-востока. Наименьшее количество влаги приносят воздушные массы с севера. Значительное, но не экстремальное количество влаги приносят воздушные массы, приходящие с запада и северо-запада. Экстремально высокие паводки обусловлены либо сильными осадками, связанными с приходом влажной воздушной массы, и конвергенцией воздушных течений над территорией бассейна (в середине лета); либо осадками, связанными с воздушными массами северо-западных направлений (в начале и конце летнего сезона). Условия формирования длительных периодов многоводий и маловодий в исследуемых бассейнах обусловлены изменениями положения фронтальной системы, разделяющей воздушные массы умеренных широт и воздушные массы летнего

Восточноазиатского муссона. Засушливый период последних 16 лет обусловлен снижением роли летнего Восточноазиатского муссона и усилением влияния западных переносов на формирование летних осадков в Монголии и южной части Восточной Сибири [14].

На рисунке 3 приведены графики хода заснеженности (снегового покрытия) в бассейне р. Онон за период 2005 - 2011 года по наблюдениям из космоса (КА Терра). На рисунке 4 показаны два предельных сценария развития весеннего снеготаяния в бассейне р. Онон за 6 последних лет. Здесь на левых картосхемах приведены снимки за 2008 год — один из малоснежных с ранней весной, а на правых картосхемах приведены снимки за 2010 год — самый многоснежный с поздней весной.

Особенностью рассматриваемой территории является большая вариация максимальной зимней заснеженности, и особенно большая вариация сроков наступления весны, превышающая полтора месяца.

Средняя многолетняя зимняя заснеженность на начало снеготаяния для бассейна р. Онон составляет около 55 %. Максимальная наблюдаемая заснеженность составляет около 97 %, соответственно, доля густых темнохвойных лесов (остаточная лесистость территории) составляет около 3 %.

Период снеготаяния в бассейне начинается в первой декаде марта — третьей декаде апреля и продолжается до первой декады мая – третьей декады июня. Разброс сроков начала периода снеготаяния составляет свыше полутора месяцев.

В бассейне р. Селенга средняя многолетняя зимняя заснеженность на начало снеготаяния составляет около 50 %. Максимальная наблюдаемая заснеженность для этого бассейна. Период снеготаяния в бассейне начинается в первой декаде марта — второй декаде апреля и продолжается до первой декады мая — второй декады июня. Разброс сроков начала периода снеготаяния составляет около полутора месяцев.

Водный режим Онона и Селенги характеризуется низким весенним половодьем, дождевыми паводками летом и осенью и продолжительной зимней меженью. По условиям водного режима рассматриваемые реки относятся к дальневосточному типу. Повышенная водность в теплое время года, обусловлена сравнительно обильными дождями, приводящими к значительным колебаниям стока, что придает форме гидрографа гребенчатый вид. Основной тип питания – дождевое.

В многолетних колебаниях водности рек Забайкалья прослеживается неправильная периодичность. Высокой водностью с паводковыми наводнениями отличались 1906 - 1921, 1930 - 1953, 1959 - 1975, 1983 - 1995 годы. Последние два десятилетия (1996 - 2012 гг.) отличались преобладанием маловодных лет.

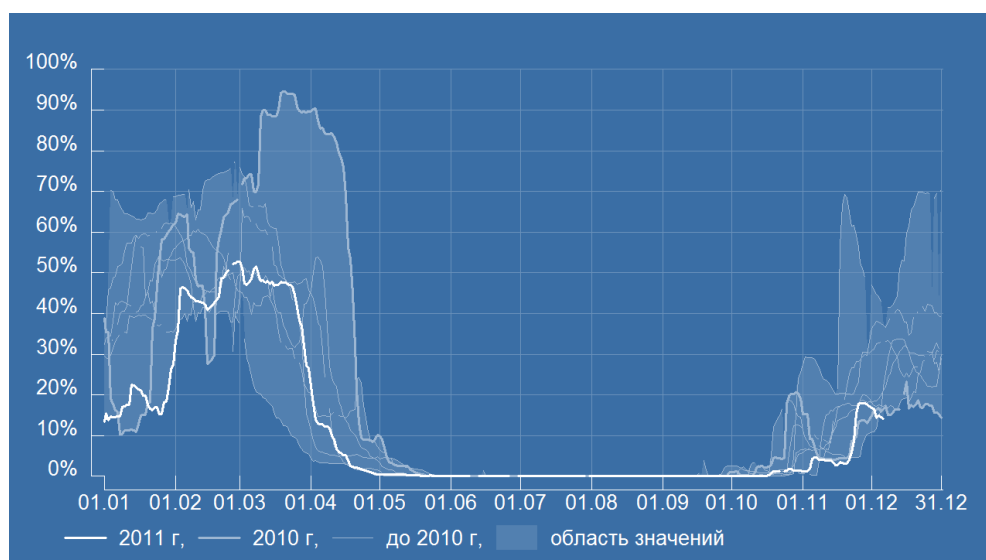


Рисунок 1.3 — Многолетняя динамика заснеженности бассейна р. Онон за 2005 - 2011 гг.

Исходные данные гидрометеорологических наблюдений. Обе рассматриваемые реки являются трансграничными, что накладывает определенные трудности на возможности решения задач гидрологических прогнозов, связанные с информационным обеспечением, в первую очередь – для российской стороны. Отсутствие информации по территории Монголии в гидрометцентре ФГБУ «Забайкальского УГМС» снижает точность прогнозов, Это касается в первую очередь населенных пунктов на реках Онон и Селенга, находящихся на российской стороне ближе к границе с Монголией. Точность прогнозов возрастает ниже по течению по мере увеличения доли площади водосбора, освещенной наблюдениями ФГБУ «Забайкальского УГМС».

Сеть пунктов наблюдений осадков, используемая для разработки методик и выпуска гидрологических прогнозов, позволяет приближенно оценить только ход осадков фронтального происхождения, распространяющихся на большие площади порядка тысяч квадратных километров. Территориальное распределение локальных (конвективных) ливневых осадков существующая сеть осадкомеров учесть не в состоянии из-за недостаточной ее густоты.

Пункты наблюдений за осадками приурочены к речным долинам и не вполне учитывают количество осадков в горах.

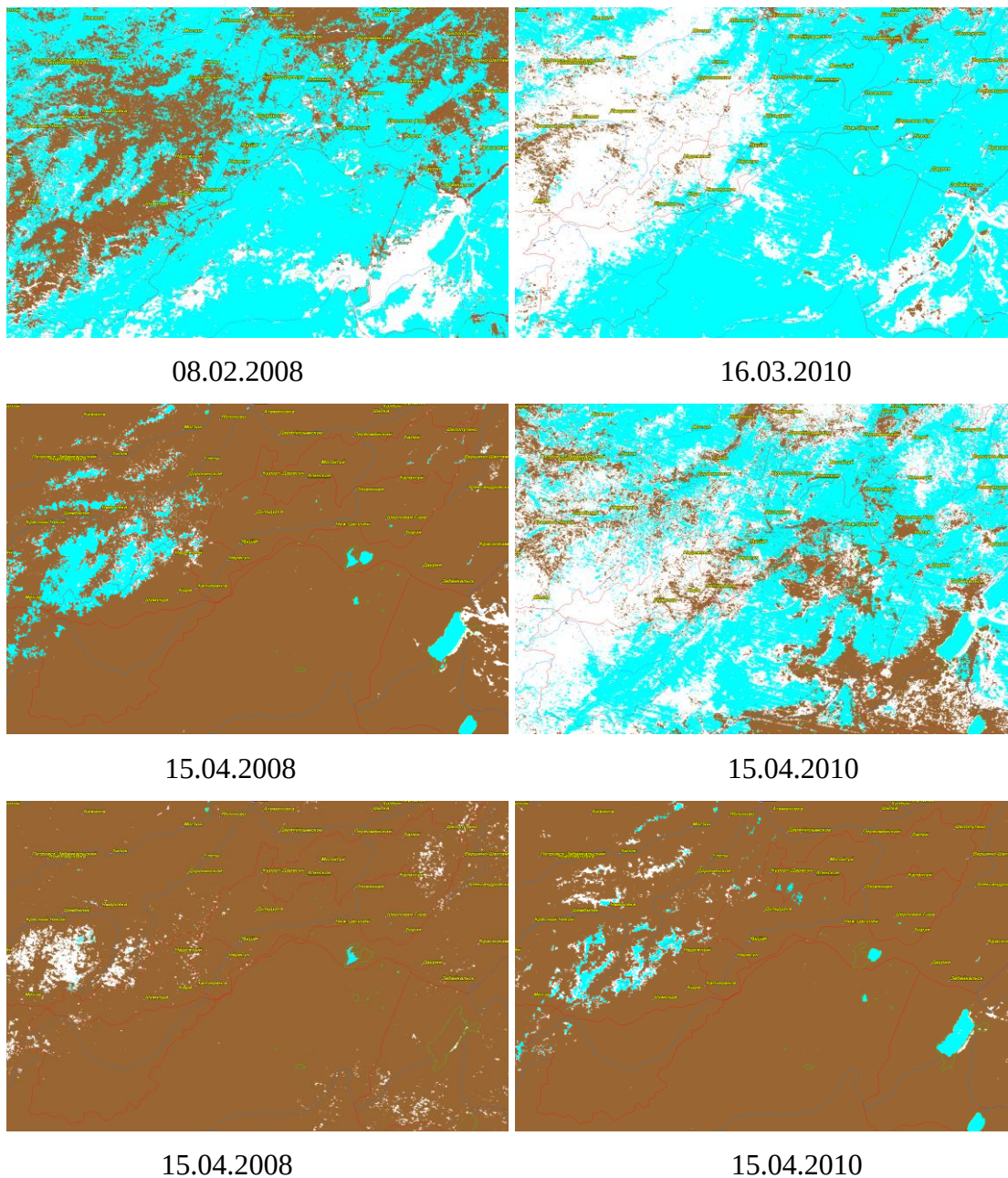


Рисунок 1.4 - Предельные сценарии развития весеннего снеготаяния в бассейне р. Онон: малоснежная зима и ранняя весна 2008 г. – слева, и многоснежная зима и поздняя весна 2010 г. – справа.

В таблицах 1.1 – 1.3 приведен список пунктов метеорологических и гидрологических наблюдений, которые используются для разработки и выпуска прогнозов ежедневных уровней воды.

1.2 Физико-статистический метод прогноза стока и максимальных уровней воды дождевых паводков

Статистические методы прогноза используют парную или множественную корреляцию характеристик весеннего половодья с обуславливающими факторами

(предикторами), например, с запасами воды в снеге, показателями осеннего увлажнения, глубиной промерзания почвы и другими. Подбор предикторов производится на основе физических представлений о процессах формирования предсказываемого явления.

Предикторы определяются по данным точечных гидрометеорологических наблюдений. Они отражают переменные из года в год условия формирования стока (снегозапасы, осеннее увлажнение бассейна, глубину промерзания почвы и др.). Пригодность любого предиктора зависит не от его частного соответствия измерениям в данной точке, а от того, как хорошо он отражает общие условия на водосборе.

Таблица 1.1 – Список пунктов наблюдений за осадками (x) и температурой воздуха (t)

Бассейн р. Онон		Бассейн р. Селенга	
Пункты наблюдений	Используемые характеристики	Пункты наблюдений	Используемые характеристики
Кыра	x, t	Кяхта	x, t
Мангут	x, t	Красный Чикой	x, t
Акша	x, t	Улан Удэ	x, t
Иля	x, t	Кабанск	x, t
Нижний Цасучей	x, t		
Борзя	x, t		
Оловянная	x, t		
Агинское	x, t		
Шелопугино	x		

Таблица 1.2. – Список пунктов гидрологических наблюдений в бассейне р. Онон

№	Пункты наблюдений	F в-сб., км. кв.	Лесистость%	Заболоченность%	H, см	Q, м ³ /с	Ср.высота водосбора, м БС
1	Онон-Верхний Ульхун	45 000			уров.	расх.	
2	Онон- Бытэв	49 500			уров.	расх.	
3	Онон- Чиндант	63 400			уров.		
4	Онон- Оловянная	75 100			уров.	расх.	
5	Онон-Чирон	95 900			уров.	расх.	
6	Кыра- Кыра	5 100	50	5	уров.	расх.	1 330
7	Иля- Иля	1 370	80	10	уров.	расх.	1 080
8	Борзя -Усть-Озерная	1 920	25	5	уров.		944
9	Борзя - Борзя	3 980	20	5	уров.	расх.	900
10	Ага- Агинское	2 190	50	10	уров.	расх.	878
11	Унда - Шелопугино	2 960	70	10	уров.	расх.	921

Предикторы по существу выступают в качестве индексов, которые, изменяясь подобно истинному значению рассматриваемой величины, способны отразить ее воздействие на исследуемый процесс.

Таблица 1.3. – Список пунктов гидрологических наблюдений в бассейне р. Селенга

№	Пункты наблюдений	F вод., кв.км	Лесис- тость%	Заболо- ченность%	Н, см	Q м³/с	Ср.высота водосбора, м БС
1	Селенга-Усть-Кяхта	282 000			уров.		
2	Селенга-Новоселенгинск	360 000			уров.	расх.	
3	Селенга-Улан-Удэ	440 000			уров.		
4	Селенга-Кабанск	445 000			уров.	расх.	
5	Джида-Хамней	8 480	85	< 10	уров.	расх.	1 520
6	Чикой-Черемхово	8 890			уров.		
7	Чикой-Гремячка	15 600	85	< 5	уров.	расх.	1 300
8	Чикой-Чиккожзавод	41 400	75	< 5	уров.		
9	Чикой-Поворот	44 700			уров.	расх.	1 260
10	Менза-Укыр	6 550			уров.		
11	Хилок-Малета	25 700	85	< 5	уров.	расх.	1 050
12	Уда-Удинск	20 800			уров.		
13	Уда-Первомаевка	28 300			уров.		
14	Уда-Улан-Удэ	49 863	95	< 5	уров.	расх.	933
15	Курба-Новая Курба	58 500	85	< 5	уров.	расх.	1 080

Применяются различные методы отбора («просеивания») предикторов, а также и более сложные приемы расчета поля стока по заданным полям предикторов.

Анализ гидрометеорологической информации и опыт предшествующих исследований показывают, что наиболее информативными предикторами прогностической модели являются паводкообразующие осадки и показатели предпаводочного увлажнения бассейнов.

Например, для небольшой реки Ага – с. Агинское (бассейн р. Онон, $F = 2190 \text{ км}^2$) установлена связь паводочного с количеством паводкообразующих осадков (определены по данным двух пунктов: Агинское и Иля) и показателем увлажнения (m) – уровнем воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (таблица 1.4).

Итак, уравнение для прогноза слоя стока дождевого паводка р. Аги – с. Агинское имеет вид

$$y = 0.270 x + 0.137 m - 33.05. \quad (1.1)$$

В таблице 5 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (1.1).

Рассмотрим уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Ага – с. Агинское (таблицы 6, 7).

Таблица 1.4 – Уравнение регрессии для прогноза слоя стока дождевых паводков (у, мм) р. Ага – с. Агинское

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков		
множественный $R = 0,831$ средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 5.26$ мм среднее квадратичное отклонение $\sigma = 9.97$ мм критерий качества методики прогноза $S / \sigma = 0.58$		
вид уравнения: $H_{\max} = a_1x + a_2m + b$ где $x = 0.57x_{\text{Агинское}} + 0.43x_{\text{Иля}}$		t-статистики
a_1	0,270	5,95
a_2	0,137	4,41
b	-33,05	-4,69

Таблица 1.5 – Проверочные прогнозы слоя стока дождевых паводков (у, мм) р. Ага – с. Агинское

Год	Дата начала выпадения паводко-образующих осадков	X мм	M см	Y мм	У _{пр} мм	Ошибки прогноза, мм
1	2	3	4	5	6	7
2003	июл 24	63.9	175	0,46	8.1	-7.7
2003	июл 31	36.3	191	1,62	2.9	-1.2
2003	авг 15	45.4	200	2,14	6.6	-4.4
1998	июн 23	89.8	209	9,20	19.8	-10.6
1998	июл 19	42.4	202	2,55	6.0	-3.5
1998	июл 24	59.2	246	16,27	16.6	-0.3
1998	авг 09	19.0	309	10,39	14.3	-4.0
1996	июн 06	23.6	191	0,27	-0.6	0.8
1996	июн 18	12.8	194	0,33	-3.1	3.4
1996	июн 28	15.3	196	0,41	-2.1	2.5
1996	июл 04	38.8	210	2,30	6.1	-3.8
1996	июл 09	49.8	228	6,41	11.6	-5.2
1996	авг 05	16.6	216	2,85	1.0	1.9
1995	июн 20	27.6	199	4,43	1.6	2.8
1993	июл 15	21.3	215	4,68	2.1	2.6
1993	июл 23	50.9	206	16,60	8.9	7.7
1992	июн 21	21.4	180	0,90	-2.7	3.6
1992	июл 30	36.4	173	0,44	0.4	0.0
1991	июл 06	50.8	204	5,14	8.6	-3.4
1991	июл 16	71.6	208	15,75	14.7	1.0
1990	июн 22	37.1	215	12,97	6.4	6.6
1990	июл 05	74.1	246	31,06	20.6	10.5
1990	авг 17	45.8	243	17,82	12.6	5.3
1988	июл 07	46.9	218	6,19	9.4	-3.2
1988	июл 21	60.6	288	30,66	22.7	8.0
1988	июл 27	38.4	316	13,36	20.5	-7.2

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3	4	5	6	7
1986	июл 08	39.7	227	1,41	8.7	-7.3
1985	июн 06	88.7	210	14,93	19.6	-4.7
1984	авг 18	110.0	216	36,08	26.2	9.9

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см)
р. Ага – с. Агинское

$$H_{\max} = 1.681 x + 1.185 m - 59.79. \quad (1.2)$$

В таблицах 1.6 и 1.7 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (1.2). Критерий качества этой методики $S/\sigma=0.48$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Таблица 1.6 – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Ага – с. Агинское

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,831$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 32.4$ см Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 67,3$ см Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 45,4$ см Критерий качества методики прогноза $S/\sigma=0,48$		
вид уравнения: $y = a_1 x + a_2 m + b$ где $x = 0.57x_{\text{Агинское}} + 0.43x_{\text{Иля}}$		t-статистики
a_1	1.681	6.58
a_2	1.185	6.79
b	-59.79	-1.50

Таблица 1.7 – Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков р. Ага – с. Агинское

Год	Дата начала выпадения паводко-образующих осадков	x^*	m	$H_{\max_{\text{факт}}}$	$H_{\max_{\text{пр}}}$	Ошибки прогноза, см
1	2	3	4	5	6	7
2003	июл 24	63.9	175	199.0	255.0	-56.0
2003	июл 31	36.3	191	196.0	227.5	-31.5
2003	авг 15	45.4	200	231.0	253.5	-22.5
1998	июн 23	89.8	209	282.0	338.8	-56.8
1998	июл 19	42.4	202	240.0	250.8	-10.8
1998	июл 24	59.2	246	360.0	331.3	28.7
1998	авг 09	19.0	309	339.0	338.3	0.7
1996	июн 06	23.6	191	200.0	206.2	-6.2
1996	июн 18	12.8	194	205.0	191.6	13.4
1996	июн 28	15.3	196	214.0	198.3	15.7
1996	июл 04	38.8	210	234.0	254.2	-20.2

Продолжение таблицы 1.7

1	2	3	4	5	6	7
1996	июл 09	49.8	228	257.0	294.2	-37.2
1996	авг 05	16.6	216	241.0	224.0	17.0
1995	июн 20	27.6	199	252.0	222.5	29.5
1993	июл 15	21.3	215	254.0	230.8	23.2
1993	июл 23	50.9	206	290.0	269.9	20.1
1992	июн 21	21.4	180	213.0	189.4	23.6
1992	июл 30	36.4	173	196.0	206.4	-10.4
1991	июл 06	50.8	204	271.0	267.4	3.6
1991	июл 16	71.6	208	300.0	307.0	-7.0
1990	июн 22	37.1	215	307.0	257.3	49.7
1990	июл 05	74.1	246	370.0	356.2	13.8
1990	авг 17	45.8	243	305.0	305.2	-0.2
1988	июл 07	46.9	218	282.0	277.4	4.6
1988	июл 21	60.6	288	406.0	383.4	22.6
1988	июл 27	38.4	316	332.0	379.2	-47.2
1986	июл 08	39.7	227	243.0	275.9	-32.9
1985	июн 06	88.7	210	328.0	338.2	-10.2
1984	авг 18	110.0	216	464.0	381.2	82.8

В Приложении А представлены аналогичные методики и примеры прогнозов для пунктов р. Иля – пос. Иля, р. Онон – с. Верхний Ульхун, р. Онон – с. Оловянное.

1.3 Концептуальная модель формирования и прогноза ежедневных уровней воды дождевых паводков

В УГМС Сибири в оперативной практике гидрологических прогнозов реализована концептуальная модель формирования стока, использующая всю доступную оперативную информацию, – наземную (температура воздуха, осадки, расходы и уровни воды в замыкающем створе и на речной системе) и спутниковую (динамика снегового покрытия территории водосбора). В обобщенном виде структура модели [3-5] показана на рисунке 1.5.

Модель состоит из подмоделей, в блоках которых для высотных зон каждого района проводятся расчеты снегонакопления, снеготаяния, водоотдачи талой и дождевой воды, склонового притока и руслового добега [3-5]. Модель использует как метеорологическую информацию, так и данные наблюдений за уровнями воды в речной системе. Запасы воды в руслах рассчитываются по наблюдениям ежедневных уровней за 8 и 20 час. Влияние русловых запасов на прогнозируемый расход (уровень) возрастает вниз по течению реки.

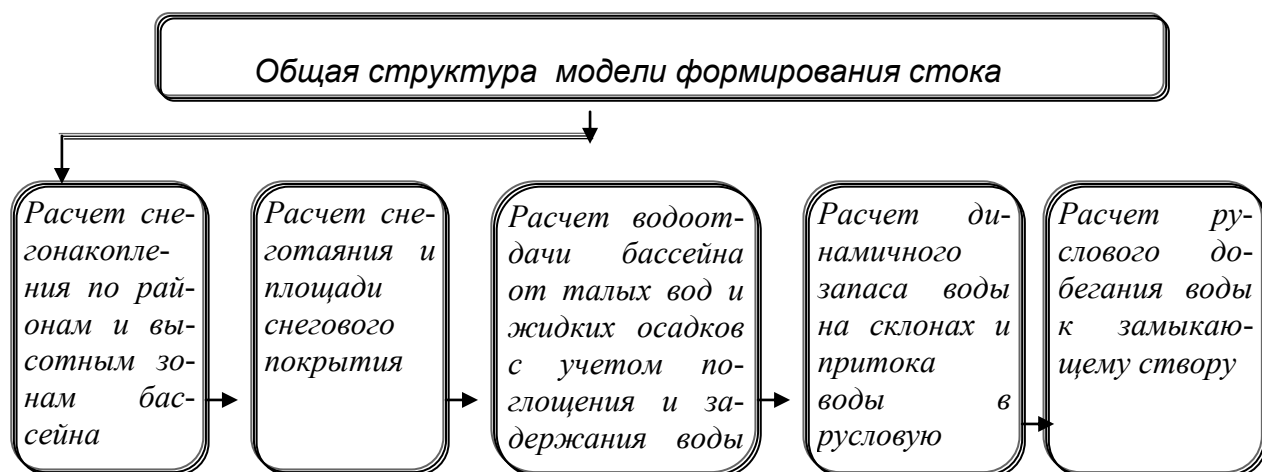


Рисунок 1.5 - Общая структура модели формирования стока.

Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и просачивание, образуют последовательные паводкообразующие периоды.

В период выпадения дождей или снеготаяния образуется интегральный слой водоотдачи речного бассейна, который согласно Е.Г. Попову [15], равен:

$$Y(t) = (1 - \omega) [H(t) - P_0 \operatorname{th}(H(t)/P_0)] \quad (1.3)$$

где: t - интервал времени; $H(t)$ - суммарный слой воды, поступивший для заполнения водоудерживающей емкости бассейна от начала снеготаяния до момента t (формулы приведены ниже); ω - доля постоянно бессточной площади; P_0 - параметр потерь, характеризующий размеры водоудерживающей емкости для наиболее сухих предшествующих условий; th - функция гиперболического тангенса. Методики расчета переменной в ходе снеготаяния площади снегового покрытия и водоудерживающей емкости снега, разработанные А.Г. Ковзелем, изложены в [15]. Подача воды на склоны в период дождя определяется путем арифметического осреднения суточного слоя осадков в пунктах наблюдений, тяготеющих к данному району (высотной зоне).

Уравнение (1.3) описывающие инфильтрационно-емкостную модель поглощения воды бассейном, позволяет рассчитать водоотдачу речного бассейна $u(t)$, под которой понимается слой стока, образующийся на склонах за единицу времени Δt

$$u(t) = Y(H(t)) - Y(H(t - \Delta t)) . \quad (1.4)$$

Расчет водоотдачи и склонового притока в период снеготаяния. В (1.4) интегральный слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость перед началом снеготаяния, определяется с учетом слоя начального заполнения емкости U , отдачи воды снежным покровом (h_c), осадков (x), испарения (z) и питания подземных вод (I), т.е.

$$H(t) = U + \sum_{i=1}^t (h_c + x - z - I)_i. \quad (1.5)$$

Интенсивность питания подземных вод (I , мм/сут) считается постоянной и принимается равной расходу воды в конце кривой истощения (спада).

Слой воды U , заполняющий водоудерживающую емкость перед началом снеготаяния, рассчитывается по логарифмической формуле

$$U = c + b \lg(d + 1), \quad (1.6)$$

в которой за индекс осеннего увлажнения d принимается осенний сток в предшествующем году. Как указывалось выше, слой воды U участвует в формировании стока после схода снега по мере оттаивания верхнего слоя почв и грунтов. Поступление воды за расчетную единицу времени Δt за счет таяния почвенного льда (U) также учитывается в расчетах водоотдачи бассейна, причем слой растаявшей воды принимается пропорциональным корню квадратному из суммы положительных температур воздуха за соответствующий период.

Подмодель склонового притока воды в русловую сеть $q(t)$ основывается на концепции динамического (гравитационного) запаса воды $W(t)$ на склонах, связанного с $q(t)$ в общем случае не линейно:

$$W(t + \Delta t) = W(t) + u(t + \Delta t) - q(t + \Delta t), \quad (1.7)$$

$$q(t + \Delta t) = \alpha \{0.5[W(t) + W(t + \Delta t)]\}^n, \quad (1.8)$$

где α - переменный коэффициент, учитывающий изменяющиеся гидравлические условия стекания воды со склонов и другие факторы [4.5]; n - показатель степени.

В расчетах стока дождевых паводков после схода снега за индекс предпаводочного увлажнения почвы на момент начала дождя использовались расход (уровень) воды в реке, или индекс предшествующих осадков m_t [13], определяемый по следующей модернизированной формуле

$$m_t = (S + U)K^{t-t_s} + \sum_{i=0}^{t-t_s} x_{t-i} K_{t-i}^i, \quad K_{t-i} = K_0 \exp[-c\theta_{t-i}] \quad (1.9)$$

где S – запас воды в снежном покрове в конце зимы; U – слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость бассейна в конце зимы, определяемый по эмпирической зависимости от показателя осеннего увлажнения; K_0 , c – коэффициенты. x_{t-i} – количество осадков за сутки $t-i$, K_{t-i} – коэффициент, зависящий от среднесуточной температуры воздуха θ ; N – период суммирования осадков (начало суммирования осадков относится к моменту завершения снеготаяния t_s).

Расчеты показали, что оба рассмотренных показателя предпаводочного увлажнения имеют примерно одинаковую репрезентативность.

В (1.4) интегральный слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость перед началом паводкообразующего дождя, определяется с учетом осадков (x), испарения (z) и питания подземных вод (I), т.е.

$$H(t) = \sum_{i=t_d}^t (x - z - I)_i, \quad (1.10)$$

где t_d – момент начала паводкообразующего дождя.

В период истощения динамического запаса воды на склонах, когда суточные осадки (x) меньше суммы потерь на испарение (z) и впитывание (I), водоотдача определяется по формуле

$$u(t) = (x - z - I)g(t) \quad (1.11)$$

где: $(x - z - I) < 0$; $g(t)$ – доля площади речного бассейна, с которой формируются потери динамического запаса воды (см. раздел 3.2). Размеры $g(t)$ в период истощения сокращаются по мере уменьшения динамического запаса воды и спада притока, что позволяет записать

$$g(t) = (1 - w)\{1 - \exp[-a_c q(t)]\}, \quad (1.12)$$

где: a_c – коэффициент; w – доля постоянно бессточной площади.

Формулы (1.4) – (1.12) позволяет вести непрерывный расчет ежедневного притока воды в русловую сеть. Напомним, что для горных территорий расчеты выполняются по районам и высотным зонам бассейна.

Вероятностная модель руслового добегания. Важное место в существующих моделях стока отводится описанию движения воды в русловой сети. Широкое применение на практике получил метод расчета, основанный на использовании кривой добегания $f(\tau)$. Кривая добегания, называемая также функцией влияния или функцией отклика, понимается обычно как трансформационная функция, с помощью которой гидрограф притока в русловую сеть речного бассейна $q(t)$ преобразуется в гидрограф стока в замыкающем створе $Q(t)$ на основе интеграла свертки

$$Q(t) = \int_0^t q(t - \tau) f(\tau) d\tau. \quad (1.13)$$

Известны несколько способов установления кривой добегания: метод единичного гидрографа, метод изохрон, линейная и вероятностная модели добегания [3, 4].

В вероятностной модели кривая $f(\tau)$ рассматривается как плотность распределения времени добегания элементарных объемов воды в гидрологической системе. Для ее аппроксимации используются двух или трехпараметрические функции плотности распределения вероятностей (гамма-распределение и другие). Для задания этих функций оцениваются моменты времени добегания. Простейшие формулы моментов получены для случая бесприточного участка реки [3, 4].

Разобьем бесприточный участок на отрезки (подучастки). Время добегания τ элементарного объема воды на всем участке выразится суммой

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n, \quad (1.14)$$

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – соответственно время добегания элементарного объема на первом, втором и т.д. отрезках; n – число отрезков. В турбулентном потоке для отрезков достаточной длины формула (1.14) представляет сумму независимых случайных величин. Полагая, что статистические характеристики добегания на отрезках однородны, на основе свойств суммы независимых случайных величин получим следующие соотношения:

$$\overline{\tau_L} = L / v, \quad \sigma_{\tau} = a \sqrt{\overline{\tau_L}}, \quad c_v = a / \sqrt{\overline{\tau_L}}, \quad M_3 = k a^2 \overline{\tau_L}, \quad (1.15)$$

где $\bar{\tau}_L = L / v$ - среднее время добегания на участке реки длиной L , v - средняя скорость добегания, для определения которой используются эмпирические формулы гидравлики открытых потоков; σ_τ – среднее квадратичное отклонение времени добегания элементарных объёмов воды; C_v – коэффициент вариации времени добегания; M_3 – третий центральный момент; a - параметр продольного рассеяния элементарных объёмов воды; k - отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации времени добегания элементарных объёмов воды (k может приниматься равным трём).

Начальные моменты времени добегания элементарных объёмов бокового притока (m_r), поступающего на участок реки, речной системы или всего бассейна, выражаются интегралом [7, 8]

$$m_r = \int_0^{\bar{\tau}_L} m_r(\bar{\tau}) p(\bar{\tau}) d\bar{\tau}, \quad (1.16)$$

где m_r - начальный момент r -ого порядка ($r=1,2,3$) времени добегания бокового притока; $m_r(\bar{\tau})$ - то же для бокового притока, поступающего на расстоянии $x = \bar{\tau}v$ от замыкающего створа ($\bar{\tau} = x / v$); $\bar{\tau}_L = L / v$; L – расстояние от замыкающего до верхнего створа (или до наиболее удаленного истока); $p(\bar{\tau})$ - функция плотности распределения объема бокового притока по длине ($x = \bar{\tau}v$) рассматриваемой реки или речной системы (момент $m_r(\bar{\tau})$ определяется по приведённым выше формулам моментов бесприточного участка с использованием уравнений связи начальных и центральных моментов). В работах [3, 4] приводятся расчётные формулы моментов кривых добегания и рекомендации в отношении определения их параметров для различных частных задач. Так, в случае равномерного распределения бокового притока по длине, моменты плотности распределения времени добегания элементарных объёмов бокового притока равны

$$\begin{aligned} m_{1h} &= \frac{\bar{\tau}_L}{2}, \quad \sigma_h^2 = \frac{a^2 \bar{\tau}_L}{2} + \frac{\bar{\tau}_L^2}{12}, \\ M_{3h} &= \frac{ka^4 \bar{\tau}_L}{2} + \frac{a^3 \bar{\tau}_L^3}{4}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Скорости добегания и параметр рассеяния могут задаваться различными по длине речной сети. С этой целью речная система делится на однородные участки. Информация о

строении графа речной сети задается в отдельном файле. Степень детализации речной сети определяется с учетом физико-географических условий бассейна. При схематизации графа речной сети рассматриваются только те реки, длина которых превышает $0.50v\Delta t$ (v – скорость добегания; Δt – расчетный интервал).

Для определения кривой добегания $f_q(\tau)$ речной бассейн (район) разбивается системой эквидистант на площадки F_i . Эквидистанты – это линии, соединяющие точки, находящиеся на одинаковом расстоянии вдоль русел до замыкающего створа. Для каждой площадки определяются моменты кривой руслового добегания по формулам, приведенным в [3, 4], причем L принимается для приточного участка равным расстоянию вдоль русел между соседними эквидистантами, а для бесприточного – расстоянию вдоль русел от нижней границы площадки до замыкающего створа. Различия скоростей добегания (v) и параметра рассеяния (a) в крупной и мелкой русловой сети учитываются с помощью специальных коэффициентов. По известным значениям моментов для межэквидистантных площадок (m_{ri}) оцениваются моменты бассейновой (районной) кривой добегания (m_r) [3]:

$$m_r = \sum_1^n \left[\frac{F_i M_i}{F \overline{M}} \right] (m_{ri}), \quad (1.18)$$

где M_i , $\overline{M}$ – соответственно норма модуля (слоя) стока i -ой высотной зоны и всего бассейна (района), определяется по картам речного стока; выражение в квадратных скобках характеризует среднюю долю притока с межэквидистантной площадки F_i . В первом приближении можно принять, что условия формирования стока однородны в бассейне (или в его части), тогда $M_i = \overline{M}$, следовательно $m_r = \sum_1^n \left[\frac{F_i}{F} \right] (m_{ri})$.

Скорости добегания и параметр рассеяния определяются с учетом данных наблюдений, либо по существующим формулам и рекомендациям и могут уточняться на этапе оптимизации параметров модели. Зная моменты кривых добегания, можно получить аппроксимации этих кривых с использованием известных функций плотности распределения вероятностей. В частности, в работах [7] использованы функции гамма-распределения и Бровковича.

Расчеты расходов воды с применением интеграла свертки (1.13) выполняются для небольших бассейнов, однородных в отношении ландшафта. В общем случае, когда речной бассейн подразделяется на отдельные ландшафтные районы, прогноз расхода воды выполняется с учетом принципа суперпозиции по выражению

$$Q(t + \Delta t) = \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{min}, \quad (1.19)$$

где: $Q(t + \Delta t)$ – расход воды в замыкающем створе; t - дата выпуска прогноза; Δt - заблаговременность прогноза; n – число ландшафтно-гидрологических районов, на которые разбит речной бассейн; $q_i(t)$ – суммарный приток в русловую сеть с i -го района (высотной зоны); $f_{q_i}(\tau)$ – кривая добегания бокового притока с i -ого района (функция влияния); $Q_w(t + \Delta t)$ – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент t) запаса воды в русловой сети; Q_{min} – устойчивое подземное («базисное») питание реки.

Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды $H_i(t)$ в пунктах наблюдений речной системы, получим следующее уравнение [3-4]:

$$H(t + \Delta t) = [c_0 \sum \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau + \sum c_i (H_i(t) - H_{i\min})^{y1} + \sum c_{i+n} (H_i(t) - H_i(t-1))^{1/y2} + H_{min}, \quad (1.20)$$

где: H – прогнозируемый уровень воды в замыкающем створе; $c_i, y1, y2$ - коэффициенты; $H_{i\min}$ - минимальный уровень воды в i -том пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета; H_{min} – то же в замыкающем створе.

Неизвестные параметры, входящие в формулы отдельных блоков модели, определяются сочетанием методов оптимизации и линейной регрессии.

Программное обеспечение, разработанное на основе рассмотренной выше гидролого-математической модели, позволяет путём численных экспериментов моделировать величины речного стока и ежедневного притока воды в водохранилища ГЭС. Известные к моменту выпуска прогноза суточные осадки, максимальные запасы воды в снежном покрове, характеристики предшествующего увлажнения бассейна, ежедневные температуры воздуха определяются по фактическим данным наблюдений.

Преимуществом применения метода моделирования является возможность усвоения среднесрочных и краткосрочных прогнозов погоды, выдача результата с суточным разрешением, а также возможность оперативной оценки влияния метеорологических особенностей на прогнозируемые уровни (расходы) воды.

Для реализации метода на практике разработана программа «Речные гидрологические прогнозы» (**ПО «Капля»**).

2 Совершенствование пользовательского интерфейса ПО «Капля», реализующего прогнозы ежедневных уровней

2.1 Постановка задачи

Как и любые другие прогнозы, гидрологические прогнозы основываются на исходных данных. Часть из них является постоянными или практически постоянными во времени (площадь бассейна, например) и не требует обновления. Другая часть представляет собой периодические измерения гидрометеорологических величин. Используются данные о температуре воздуха (°C), осадках (мм) и уровнях (см) или расходах воды (м³/с). Помимо фактических данных за период с начала снеготаяния (в нашем случае, ввод данных начинается с 21 марта) используется краткосрочный прогноз погоды до требуемой заблаговременности прогноза (до 7 суток).

Используются данные, измеряемые на стационарных гидрологических постах и метеостанциях, расположенных как на территории бассейна, так в непосредственной близости от него. Как правило, используются данные всех имеющихся в наличии постоянно действующих постов и станций.

Однако даже при ограниченном гидрометеорологическом обеспечении прогнозов в условиях Сибири, ***сам процесс ввода данных становится обременительной процедурой.*** Оператору программы требуется для каждого бассейна ввести данные с одного-трёх десятков станций. Итого — ввести около 100 чисел только для одного бассейна. А в одном УГМС нередко используются модели для нескольких бассейнов. Фактически оператор только тем и занят при расчёте прогноза, что вводит данные — сам расчёт делается быстро. Опасность внесения ошибки при вводе сотни чисел очевидна сама по себе. А обременительная процедура ввода является ещё и потому, что нередко ***данные с одной станции используются в моделях нескольких бассейнов, поэтому одно и то же число надо вводить несколько раз, для каждого бассейна отдельно.***

В случае с речными гидрологическими прогнозами ввод данных не является простым вводом информации в программу. В российской практике традиционно принято возлагать обязанности по контролю данных непосредственно на прогнозиста. Человек решает, анализируя ситуацию, является ли данное значение корректным или ошибочным. Поэтому ввод каждого значения в программу сопровождается контролем, путём сравнения с соседними станциями и с предыдущими по времени значениями. Недостоверные значения, исходя из опыта оператора, либо корректируются, либо заменяются на вчерашнее значение.

Собственно, из этих соображений в предыдущих версиях программы «Речные гидрологические прогнозы» никакой особой автоматизации ввода не предусматривалось. Данные в программе представлены в виде таблицы, в колонках которой находятся отдельные параметры отдельных станций, а по строкам вниз растёт дата (рисунок 2.1). Очередные величины оператор вводит в ячейки, сравнивая их с предыдущими значениями в строках выше, а также с другими станциями в той же строке. При сомнении в достоверности величины оператор может в качестве первого приближения просто скопировать вчерашнее значение, или скорректировать его по остальным данным в таблице.

Учитывая все выше сказанное, необходимо **максимально избавить оператора от рутинного ввода чисел, сохранив за ним возможность контроля и коррекции значений.** Это можно сделать путём добавления в существующую программную оболочку модуля автоматического ввода данных. Не урезая и не заменяя имеющуюся функциональность программы в области ввода данных, автоматический ввод данных должен обеспечить максимально возможную полноту ввода из имеющихся в электронном виде источников (все данные вместе с самой моделью для каждого бассейна хранятся в одном файле, так называемом, проекте, имеющем расширение *hws*).

Параметр	SSVas	SNVas	SStar	SPudi	SPoli	SNapa	mNVas	mTNap
Значение	105	118	126	94	87	124	45	170

Рисунок 2.1 — Внешний вид программы в режиме ввода данных.

В первую очередь, такими источниками являются файлы проектов других бассейнов. Если на момент открытия проекта какого-либо бассейна данные, необходимые для него, уже были введены в проект какого-либо другого бассейна, то их можно взять оттуда — причём уже прошедшими контроль! Организовав, таким образом, некоторую распределённую по файлам единую базу данных.

Во вторую очередь, источником могут служить существующие системы сбора и хранения данных подразделений гидрометеорологической службы. В каждом управлении на постоянной основе функционирует такая система, и в конечном счёте все данные в том или ином виде берутся из неё.

2.2 Организация распределённой базы данных

Принципы организации распределённой базы данных

Под распределённой базой данных обычно понимают совокупность логически взаимосвязанных баз данных, распределённых в компьютерной сети. При этом каждая база данных является полноценной базой данных сама по себе, и, в то же время, у пользователя любой из них имеется полный доступ к данным всех баз одновременно. В нашем случае полноценная реализация этого определения нецелесообразна. База данных программы не имеет постоянно действующей серверной СУБД. Фактически, она является однопользовательской персональной однофайловой СУБД— набор данных для одного бассейна, хранимый в одном файле и используемый одновременно лишь одним пользователем. Нет необходимости создавать связь между несколькими компьютерами, хотя это и возможно. Важна вторая часть определения: пользователь любой из баз, входящих в распределённую систему, имеет доступ к данным всех баз. Именно наличие этой функциональности требуется от программы и позволяет называть систему из нескольких файлов распределённой базой данных.

Одновременный доступ к данным всех проектов из каждого запущенного обеспечивается реализацией двух принципов:

- каждая физическая величина (температура, осадки и т.п.) каждой станции имеет уникальное имя, позволяющее однозначно идентифицировать её в базе данных бассейна;
- имеется способ получить имя файла каждого проекта, входящего в распределённую базу данных.

При реализации этих двух принципов алгоритм доступа ко всем данным распределённой базы будет выглядеть как простой перебор всех параметров в каждом файле и копирования в текущую базу новых найденных данных. Эта операция может делаться по команде оператора или, что естественнее, автоматически при запуске программы.

Принцип уникального имени каждого параметра каждой станции реализуется назначением каждому параметру идентификатора. Задача обеспечения уникальности идентификаторов ложится на разработчика. Потребитель получает предварительно подготовленный файл проекта бассейна, и не знает ни идентификаторов, ни даже факта их наличия. Данный механизм от операторов скрыт и абсолютно прозрачен для всей остальной функциональности программы. Просто с каждым параметром каждой станции связан скрытый уникальный идентификатор, позволяющий программно правильно отождествить одинаковые параметры в разных файлах проектов.

Принцип ограничения круга файлов распределённой базы данных реализуется организационными мерами, а именно: хранением всех файлов, входящих в распределённую базу данных, в одном каталоге. Если программа при открытии находит в том же каталоге, что и открываемый файл проекта, другие файлы проектов, то считает, что открываемый файл входит в распределённую базу данных, и начинает процедуру сбора новых данных из других файлов. Если же она таких файлов не находит, то является одиночным проектом, и поиск новых данных невозможен. Данный механизм, опять таки, является абсолютно прозрачным для всей остальной функциональности программы. Нет даже необходимости в возможности явного отключения этой новой функции. Оператор, запускающий программу в отдельном каталоге даже не догадается о наличии этой функции.

Пользовательский интерфейс для работы в режиме распределённой базы данных

В силу полной прозрачности функции распределённой базы данных для всей прочей функциональности программы, её пользовательский интерфейс минимален, насколько это возможно. Если в некоторых проектах ранее уже были набраны новые данные с каких-либо станций, то в открываемом файле проекта эти данные вносятся в базу автоматически, после подтверждения пользователя на запрос (рисунок 2.2) непосредственно после открытия файла.

Для того, чтобы этот механизм автоматического ввода данных работал, **файлы бассейнов должны находиться в одном и том же каталоге**. Программа ищет данные для автоматического ввода только в том же каталоге, что и файл открытого бассейна. Если вы перенесёте файл бассейна в другой каталог (папку), то программа будет работать, но данные автоматически обновляться не будут.

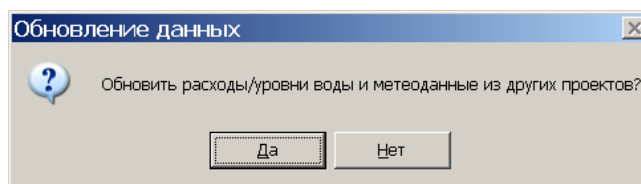


Рисунок 2.2 — Запрос пользователя об обновлении из других файлов распределённой базы данных.

Решение о новизне данных принимается по времени модификации файла проекта — проект, сохранённый последним, считается имеющим самые свежие данные. Данные никогда не перезаписываются поверх существующих, несмотря на новизну файла — только заносятся в пустые поля таблицы. С точки зрения оптимального процесса ввода данных целесообразно начинать работу с бассейна, включающего наибольшее число параметров, используемых в других бассейнах.

2.3 Интеграция с системами сбора данных УГМС

Принципы интеграции с системами сбора данных

В каждом УГМС на постоянной основе функционирует система сбора и хранения данных. В конечном счёте все данные в том или ином виде берутся из неё. Для доступа к этой информации необходимо знать внутреннюю структуру хранилища, иметь опыт работы с используемой для него СУБД, соответствующие драйвера, иметь учётную запись для разрешения на доступ в хранилище, а также сопровождать все изменения и обновления хранилища необходимыми изменениями в программе. Совокупное число связей, возникающих при этом между относительно независимой и самодостаточной программой «Речные гидрологические прогнозы» и крупной системой сбора и хранения данных в мировом масштабе, сможет легко удвоить сложность и стоимость самой программы. Поэтому для упрощения процесса интеграции было принято решение о разделении процедуры ввода данных на две части.

Одна часть процесса ввода данных реализуется системными программистами, обслуживающими систему сбора и хранения данных подразделения Росгидромета, в котором используется программа «Речные гидрологические прогнозы». Эта часть реализует всю логику доступа, выбора и форматирования данных в два текстовых файла, предназначенных для чтения программой.

Вторая часть реализована в самой программе и ответственна за чтение этих двух файлов и ввод данных в саму базу бассейна. Наличие зафиксированного формата двух

файлов позволяет изолировать программу от любых изменений системы сбора и хранения данных Росгидромета. Столь неравное, на первый взгляд, разделение обязанностей между программистами (большая часть работы падает на системных программистов подразделений Росгидромета) на самом деле компенсируется значительно меньшей сложностью создания простого текстового отчёта в табличной форме в знакомой им по обязанностям СУБД, в любой из которых есть встроенные средства создания таких отчётов. Реализация программного доступа непосредственно из программы стала бы намного дороже (чего стоит, например, «таскание» за программой набора драйверов СУБД и их корректная инсталляция и настройка при каждой установке программы), или свелась бы к тому же самому только ценой изучения новой СУБД в каждом подразделении Росгидромета.

Программно ввод данных реализован в виде процедуры, запускаемой при открытии файла проекта. Если на этот момент в проекте были настроены пути к двум файлам данных — *файлу метеоданных и файлы уровней/расходов, называемых в программе «файлами внешних данных»* — то после разрешения пользователя данные считываются из файлов, и данные обновляются в базе проекта. Данная функция абсолютно прозрачна для остальной функциональности программы, и, если не требуется, никак себя не проявляет.

Пользовательский интерфейс для интеграции с системами сбора данных

В отличие от функции распределённой базы данных, использование данных из внешних источников требует предварительной настройки. Данные внешних источников должны быть представлены двумя файлами — уровни/расходы (традиционно, qh.dat) и осадки/температуры (традиционно, xt.dat). Эти файлы должны создаваться программным обеспечением из базы данных УГМС. Файлы могут находиться в любом месте, доступном для пользователя, выпускающего прогноз. Местонахождение этих файлов настраивается в пункте меню «Настройка/Внешние файлы данных...» (рисунок 2.3).

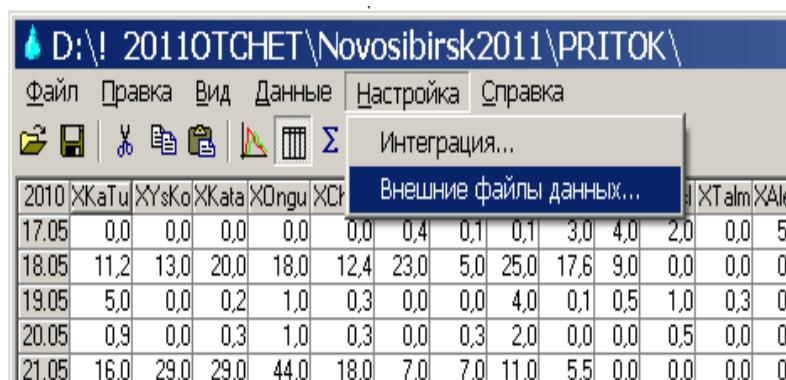


Рисунок 2.3 — Пункт меню настройки путей к файлам внешних данных.

После выбора этого пункта меню появится диалоговое окно (рисунок 2.4).

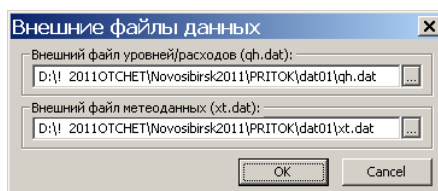


Рисунок 2. 4 Диалоговое окно настройки путей к файлам внешних данных.

В этом окне необходимо указать полный путь (можно указать сетевой путь) к файлам данных (в данном случае это файлы *qh.dat* и *xt.dat*). Эти файлы должны содержать данные тех, и только тех, пунктов, которые используются для прогноза в данном бассейне. Вообще, для каждого бассейна должна существовать собственная пара файлов (*qh.dat* и *xt.dat*), и каждый бассейн необходимо настроить описанным выше способом на эту собственную пару файлов. Только если для двух бассейнов и параметры, и станции, и их порядок совпадают можно использовать один и тот же файл. Это применимо, например, для двух моделей уровней и расходов для одного бассейна в этом случае, возможно (но не обязательно!), файл метеоданных будет одинаковым, однако, файл уровней/расходов будет отличаться минимум одним параметром.

При открытии файла проекта, если в нём указаны пути к файлам внешних данных, и эти файлы существуют, пользователю выдаётся запрос на разрешение обновления данных из внешних файлов (рисунок .5).

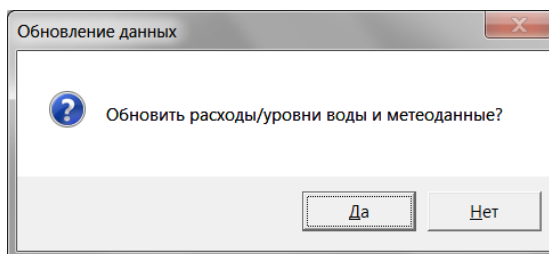


Рисунок 2.5 — Запрос на обновление данных из внешних файлов.

При утвердительном ответе данные импортируются, иначе ничего не делается. При необходимости можно произвести ввод из внешних файлов в любое время при открытом проекте командой меню «Данные/Обновить из внешних файлов» (рисунок 2.6).

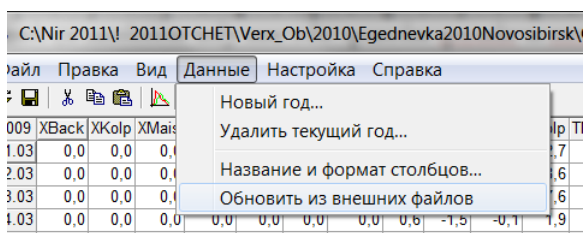


Рисунок 2.6 — Пункт меню для обновления данных из внешних файлов.

Текстовые форматы внешних данных для обоих файлов одинаковы. Файлы представляют собой таблицу из строк с одинаковым числом значений в строке, разделённых хотя бы одним пробельным символом. Число значений в строке на три больше числа параметров. Первым значением идёт месяц, вторым — день месяца, далее идут параметры за эту дату текущего года в том порядке, в котором они используются программой, и в последней колонке флаг строки. Каждое поле интерпретируется как число — целое или вещественное. Флаг строки является целым числом и служит для обозначения конца набора данных. Во всех строках, кроме последней, он должен быть равен числу 1, в последней строке набора он должен быть равен числу 2. Содержимое файла в строках за флагом строки, а также после последней строки набора игнорируется, и может быть использовано для отладочных целей. Ниже приведён пример реального файла *qh.dat*, генерируемого на примере модели уровней створа Нижневартовска бассейна Средней Оби:

03	21	2510	256	125	371	265	200	315	116	264	154	1	строка_001
03	22	2570	264	126	371	265	200	316	113	264	154	1	строка_002
03	23	2623	271	126	371	265	200	316	113	264	154	1	строка_003
03	24	2638	273	127	371	265	200	354	113	264	155	1	строка_004
03	25	2653	275	127	371	265	201	359	114	264	155	1	строка_005
03	26	2675	278	127	371	265	201	363	117	264	156	1	строка_006
03	27	2690	280	128	370	265	202	366	121	264	157	1	строка_007
03	28	2706	282	130	370	266	203	369	124	264	157	1	строка_008
03	29	2722	284	131	370	268	204	372	129	264	158	1	строка_009
03	30	2738	286	133	370	270	204	374	131	264	160	1	строка_010
03	31	2754	288	135	371	271	204	400	134	264	162	1	строка_011
04	01	2770	290	135	371	272	204	410	137	264	164	1	строка_012
04	02	2786	292	136	371	273	205	410	141	265	165	2	строка_013

В этом примере между месяцем и днём месяца применено три пробела, а в остальных местах табуляции. Дата первой строки набора 21 марта, последней строки набора — 2 апреля. Число параметров — 10. После флага строки сформирован отладочный счётчик строк, игнорируемый программой. В конце файла, после набора данных — 3 пустых строки, также игнорируемых программой.

Новая система подготовки данных и интерфейс корректировки для импорта в ПО «Капля» разработана в 2012 г в ФГБУ «СибНИГМИ» (исполнители А.Б. Колкер и А.В. Гочаков).

Система оперирует с данными, предназначенными для гидрологических прогнозов по бассейнам рек и включает в себя три компонента:

- выборка и хранение данных гидрологии;
- веб-интерфейс корректировки данных за дату;

- генерация файлов для импорта в программу «Капля».

Конечная цель системы — автоматизация процесса передачи данных в программу «Капля» с возможностью удобной корректировки и контроля поступающей информации. Для обеспечения совместимости с форматом данных файла импорта разработана база данных хранения информации, включающая идентификатор типа данных и путь к каталогу данных, используемый программой капля для импорта.

2.4 Инструкция по импорту данных для программы «Капля»

Настройка браузера

- 2 Открыть Internet Explorer
- 3 Выбрать пункт меню Сервис->Свойства обозревателя
- 4 Выбрать вкладку «Безопасность», затем зону «Надежные узлы».
- 5 Нажать кнопку «Узлы», в строку «Добавить узел в зону» занести адрес <https://10.9.0.200>, нажать «Ок».

Инструкция по использованию формы корректировки данных

В строке запроса ввести <https://10.9.0.200/cgi-bin/chita/gidro/adjust.cgi>, со всем соглашаться.

Форма представлена следующими элементами (рисунок 2.7):

Каталог – пункт прогноза, для которого осуществляется сохранения соответствующих внешних файлов для импорта в программу hws.

Дата – дата корректировки оперативных значений (по клику по полю даты отображается календарь).

The screenshot shows a web form with two main sections. On the left, under the label 'Каталог:', there is a dropdown menu currently showing 'Ульхун' and a 'Выбрать' button below it. On the right, under the label 'Дата:', there is a text input field showing '01.05.20' and a calendar widget. The calendar is for the month of May 2013, with days of the week (Пн, Вт, Ср, Чт, Пт, Сб, Вс) as headers. The date '01' is highlighted in green. At the top of the calendar are buttons 'Очистить' and 'Заккрыть'. Below the calendar are navigation links '<Пред', 'Сегодня', and 'След>'.

Рисунок 2.7 - Выбор пункта и даты корректировки.

Указав каталог и дату, по нажатию кнопки «Выбрать» отобразится две таблицы (синоптика и гидрология) значений в соответствии с набором станций (таблица 2.1) и типов данных для данного пункта. Таблица для корректировки данных содержит номер станции, название станции, тип данных (осадки, температура, гидрологический уровень), поле корректировки значений (рисунок 2.8).

Для обновления старого значения на корректное, необходимо ввести новое значение в поле «Новое значение». Нажать кнопку «Сохранить», согласиться на исполнение ActiveX.

По нажатию кнопки «Сохранить» производится обновление значений данных на указанное новое значение.

Также создается файл выбранного пункта прогноза за время наблюдений, начиная с 21 марта текущего года (таблица 2.1). Сохранение производится в папку [C:\kapData\](#).

Таблица 2.1– Соответствие названий файлов и пунктов прогноза

Бассейн р. Онон		
Пункт прогноза	Файл гидрологических данных	Файл синоптических данных
р.Онон - с. Верхний Ульхун	ulchunQH.dat	ulchunXT.dat
р.Онон - с. Бытэв	betevQH.dat	betevXT.dat
р.Онон – с. Оловянная	olovQH.dat	olovXT.dat
р.Онон – с. Чиндат	cindatQH.dat	cindatXT.dat
р.Онон – с. Чирон	chironQH.dat	chironXT.dat
Бассейн р. Селенга		
р. Селенга – с. Кабанск	kabanskQH.dat	kabanskXT.dat
р.Селенга–Новоселингинск	novoselenginskQH.dat	novoselenginskXT.dat
р. Селенга – г. Улан-Уде	ulanudeQH.dat	ulanudeXT.dat

Корректировка синоптических данных за дату 9.5.2013 и сохранение в файл XT.dat

Станция	Название	Тип	Значение	Новое значение
30949	Кыра	осадки	3.0	
30954	Мангут	осадки	4.0	
30949	Кыра	температура	7.6	
30954	Мангут	температура	8.4	

Корректировка гидрологических данных за дату 10.5.2013 и сохранение в файл QH.dat

Станция	Название	Тип	Значение	Новое значение
6089	Кыра,р.Кыра	уровень	183.0	
6076	Верхний-Ульхун,р.Онон	уровень	236.0	
6089	Кыра,р.Кыра	уровень	189.0	
6076	Верхний-Ульхун,р.Онон	уровень	242.0	

Рисунок 2.8 - Внешний вид интерфейса корректировки данных.

3 Автоматизированная технология прогноза ежедневных уровней воды с применением концептуальной модели на реках Онон и Селенга

3.1 Задание морфометрических характеристик бассейна

Выше, в разделе 2, при рассмотрении вероятностной модели расчета руслового добегания, описание русловой сети представлялось в виде схемы эквидистант, предложенной А.В. Огиевским для построения макрогенетических моделей движения воды по русловой сети бассейна. Построим в речном бассейне систему эквидистант – линий, соединяющих точки, находящиеся на одинаковом расстоянии вдоль русел до замыкающего створа (рисунок 3.1). Пусть F_i – размеры площадки между смежными эквидистантами.

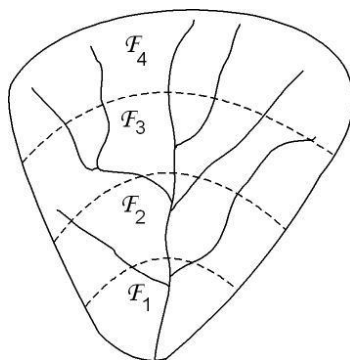


Рисунок 3.1 - Схема расположения в бассейне эквидистант

В таблицах 3.1.1 и 3.1.2 представлены:

- 1) расстояния от нижних границ каждой площадки до замыкающего створа бассейна,
- 2) расстояния по руслам между эквидистантами, выделяющими каждую площадку в бассейне или районе,
- 3) Относительные размеры площадок $f_i = \frac{F_i}{F}$ для бассейна или района. Напомним, что районы выделяются на достаточно крупных реках для приближенного учета неравномерности выпадения осадков по площади их водосборов.

В горных бассейнах выделяются высотные зоны, – для учета высотной поясности в распределении гидрометеорологических характеристик. В таблицах 3.1.1 и 3.1.2 приведены средние высоты этих зон и доли их площади по отношению к площади бассейна (района).

Таблица 3.1.1 – Морфометрические характеристики бассейнов (районов) р. Онон

Номер площадки	1	2	3	4	5	6
р. Онон – с. Верхний Ульхун, площадь водосбора 45000 км²						
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	111	222	333		
Расстояние между эквидистантами, км	111	111	111	111		
Размеры площадки (доли единицы)	0,13	0,35	0,35	0,17		
Средняя высота высотной зоны, м	635	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны	0,148	0,389	0,293	0,132	0,035	0,03
р. Онон – с. Бытэв, площадь водосбора 49500 км²						
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	111	222	333	444	
Расстояние между эквидистантами, км	111	111	111	111	111	
Размеры площадки (доли единицы)	0,091	0,118	0,318	0,318	0,135	
Средняя высота высотной зоны, м	935	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны	0,167	0,390	0,283	0,125	0,033	0,003
р. Онон – с. Оловянная, площадь водосбора 75100 км²						
Район 1 (Бытэв – Оловянная), площадь района 25600 км²						
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	144				
Расстояние между эквидистантами, км	144	144				
Размеры площадки (доли единицы)	0,56	0,44				
Средняя высота высотной зоны, м	841	1050	1290	1530	1784	
Доля площади высотной зоны	0,354	0,395	0,181	0,057	0,012	
Район 2 (исток – Бытэв), площадь района 49500 км²						
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	288	399	510	621	732	
Расстояние между эквидистантами, км	111	111	111	111	111	
Размеры площадки (доли единицы)	0,091	0,118	0,318	0,318	0,155	
Средняя высота высотной зоны, м	935	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны	0,167	0,390	0,283	0,125	0,033	0,003

Таблица 3.1.2 – Морфометрические характеристики бассейнов (районов) р. Селенга

Номер площадки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
р. Селенга – г. Новоселенгинск, площадь водосбора 354000 км²										
Район 1 (Оловянная – Чиндат), площадь района 13900 км ²										
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	99	198	297	396	495	594	693	792	952
Расстояние между эквидистантами, км	99	99	99	99	99	99	99	99	99	160
Размеры площадки (доли единицы)	0,033	0,055	0,116	0,080	0,119	0,104	0,112	0,135	0,88	0,159
Средняя высота высотной зоны, м	716	1047	1485	1912	2350	2780	3112			
Доля площади высотной зоны	0,043	0,217	0,359	0,222	0,024	0,024	0,02			
р. Селенга – г. Улан-Удэ, площадь водосбора 440000 км²										
Район 1 (Усть-Кяхта – Улан-Удэ), площадь района 158000 км ²										
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	61	122	221	320					
Расстояние между эквидистантами, км	61	61	99	99	99					
Размеры площадки (доли единицы)	0,03	0,10	0,23	0,31	0,34					
Средняя высота высотной зоны, м	609	920	1220	1250	1820	2103				
Доля площади высотной зоны	0,16	0,37	0,28	0,15	0,04	0,005				
Район 2 (исток – Усть-Кяхта), площадь района 282000 км ²										
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	419	518	617	716	815	914	1013			
Расстояние между эквидистантами, км	99	99	99	99	99	99	160			
Размеры площадки (доли единицы)	0,11	0,15	0,12	0,13	0,16	0,14	0,19			
Средняя высота высотной зоны, м	743	1140	1560	1980	2400	2820	3238			
Доля площади высотной зоны	0,07	0,26	0,33	0,22	0,09	0,03	0,002			
р. Селенга – г. Кабанск, площадь водосбора 445000 км²										
Район 1 (Усть-Кяхта – г. Кабанск), площадь района 163000 км ²										
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	0	90	151	212	311	410				
Расстояние между эквидистантами, км	90	61	61	99	99	99				
Размеры площадки (доли единицы)	0,03	0,05	0,09	0,22	0,29	0,32				
Средняя высота высотной зоны, м	609	920	1220	1520	1820	2103				
Доля площади высотной зоны	0,16	0,37	0,28	0,15	0,04	0,005				
Район 2 (исток – Усть-Кяхта), площадь района 282000 км ²										
Расстояние площадки между эквидистантами до замыкающего створа, км	509	608	707	806	905	1004	1103			
Расстояние между эквидистантами, км	99	99	99	99	99	99	160			
Размеры площадки (доли единицы)	0,11	0,15	0,12	0,13	0,16	0,14	0,19			
Средняя высота высотной зоны, м	743	1140	1560	1980	2400	2820	3238			
Доля площади высотной зоны	0,07	0,26	0,33	0,22	0,09	0,03	0,002			

Математические соотношения модели рассмотрены во втором разделе настоящего отчета, а также в [3, 4]. Напомним, что модель учитывает как метеорологические параметры (осадки, температуру воздуха, снегонакопление), так и гидрологические (уровни или расходы воды в речной сети бассейна).

Оптимизация параметров модели выполнена по ежедневным данным гидрометеорологических наблюдений с 1981 по 2010 гг.

3.2 Общая схема оптимизации параметров модели прогноза

Формулу (1.19, раздел 1.3) представим в следующем виде:

$$z = c_0 z_0 + c_1 z_1 + c_2 z_2 + \dots + c_{n+1} z_{n+1} + c_{n+2} z_{n+2} + \dots \quad (3.1)$$

$$\text{где } z = (H(t+\Delta t) - H_{\min})^{y_2}; \quad z_0 = c_0 \sum_{j=1}^N \int_0^{\Delta t} q_j(t + \Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau; \quad z_1 = (H_1(t) - H_{1\min})^{y_1};$$

$$z_2 = (H_2(t) - H_{2\min})^{y_1}; \dots; \quad z_{n+1} = H_1(t) - H_1(t-1); \quad z_{n+2} = H_2(t) - H_2(t-1); \text{ и.т.д.} \quad (3.2)$$

Уравнение (3.1) является линейным относительно коэффициентов $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots$, следовательно, эти коэффициенты могут быть найдены по данным наблюдений за прошлые годы методом наименьших квадратов (линейная регрессия).

Общую схему алгоритма для определения параметров модели можно представить в виде следующей последовательности операций:

- 1) задаёмся приближёнными значениями параметров, входящих в уравнения подмоделей притока в русловую сеть и других [3,4];
- 2) используя исходную ежедневную гидрометеорологическую информацию за предшествующие годы (в расчётах использовались ежедневные данные за 26 лет), находим по рассмотренным выше (раздел 1.3) соотношениям модели суточные значения $z, z_0, z_1, z_2, \dots, z_n, z_{n+1}, z_{n+2}$ по формулам 3.2;
- 3) методом наименьших квадратов определяем коэффициенты $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots$;
- 4) используя метод оптимизации Розенброка [3], автоматически назначаем новое приближение параметров (пункт 1);
- 5) далее вновь находим суточные значения $z, z_0, z_1, z_2, \dots, z_n, z_{n+1}, z_{n+2}$ (с учётом новых параметров);
- 6) вновь находим методом наименьших квадратов коэффициенты $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots$, последовательно повторяя весь этот цикл расчётов до тех пор, пока критерий ка-

чества прогноза (средняя квадратичная ошибка) не достигнет наименьших возможных значений и в процессе дальнейшей оптимизации перестанет изменяться в пределах заданной точности оптимизации.

Оптимизация параметров модели проводится в несколько этапов. Причём, если бассейн разбивается на районы, целесообразно первоначально оценить параметры для одной-двух типичных рек каждого района, принимая их в процессе дальнейшей оптимизации за исходные в соответствующих районах рассматриваемого бассейна.

Итак, рассмотрим последовательность оптимизации параметров.

Оптимизируются два варианта модели:

А) без учёта уровней воды по длине речной системы (модель “снеготаяние–осадки–сток”):

$$Q(t+\Delta t) = \sum_{j=1}^N \int_0^{t+\Delta t} q_j(t + \Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau; \quad (3.3)$$

Б) комбинированная модель (3.6, 3.7).

Параметры подмоделей склонового притока и др., полученные в процессе оптимизации варианта модели А), в дальнейшем без изменений используются в комбинированной модели Б). В комбинированной модели дополнительно подлежат определению коэффициенты $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots$ и показатели степени y_1 и y_2 . В процессе оптимизации варианта А) выполняются следующие этапы.

Этап 1.

С учётом накопленного опыта и результатов оптимизации для рек-аналогов задаются исходные значения параметров для каждого района, и проводится предварительная оптимизация параметров подмоделей, входящих в формулы (3.1, 3.2).

Этап 2.

Далее для всех районов и, по возможности, высотных зон производится сопоставление вычисленных по модели и “фактических” средних многолетних значений стока за май-сентябрь по данным за годы, вошедшие в оптимизацию.

“Фактические” значения перечисленных характеристик определяются на основе обобщения гидрометеорологических данных многолетних наблюдений. Средние многолетние характеристики стока за май-сентябрь по выделенным трем районам (таблица 3.1) определяются по данным наблюдений.

В результате анализа расхождения вычисленных по модели значений этих характеристик проводится дальнейшая корректировка параметров потерь стока с целью достижения наиболее близкого совпадения «модельных» и «фактических» величин.

3.3 Результаты проверочных прогнозов ежедневных уровней вод с применением математической модели

Разработанный метод предназначен для выпуска прогнозов ежедневных уровней воды в летне-осенний период, после завершения снегового половодья. Метод прогноза учитывает всю доступную информацию. Существенный вклад в повышение точности прогноза дает учет информации об уровнях воды в 8 и 20 часов в речной сети бассейна.. Тем самым учитываются русловые запасы воды на дату выпуска прогноза.

В таблице 3.2 представлены результаты оценки показателя качества методики прогнозов за многолетний период (2000 – 2010 гг.) по данным зависимых наблюдений. В таблице 3.3 приведены допустимые ошибки прогнозов за тот же период. Качество проверочных прогнозов по материалам наблюдений характеризуется как «удовлетворительное» и «хорошее» (таблица 3.2). Точность прогнозов снижается с приближением к границе с Монголией. Так, для р. Онон – Верхний Ульхун, расположенном у границы с Монголией, критерии качества для всех заблаговременностей прогноза превышают 0,70. Для пунктов, расположенных ниже по течению реки, критерии качества улучшаются (менее 0,70), а для створа Чиндат они в ряде случаев меньше 0,50, т.е. методика оказывается «хорошей».

Бассейн р. Селенги на площади 65 процентов и более (территория Монголии) не освещен данными наблюдений. Критерии качества прогноза при заблаговременности более 2-х суток у Новоселенгинска превышают 0,67 - 0,70 (таблица 3.2). Для г. Улан-Удэ при заблаговременности 1 - 5 суток качество прогнозов оценивается критерием от 0,48 до 0,60, т.е. «хорошее» и «удовлетворительное». Оценка качества прогноза за 2013 г, который не использовался при разработке методики, дает аналогичные и несколько лучшие результаты.

Рассмотрим влияние информационного обеспечения на точность прогноза паводков на примере р. Селенги (пункты Кабанск, Улан-Удэ и Новоселенгинск).

В настоящее время в нижнем створе (Кабанск) прогнозы даются только по наблюдениям пунктов, указанных в таблице 3.5, расположенных на территории России: 10 пунктов – уровни воды; 4 пункта – осадки; 4 пункта – температура воздуха.

За период с 2007 по 2010 гг в отделе гидрологических прогнозов Забайкальского УГМС имеются данные наблюдений не только по российской, но и по монгольской части бассейна (всего по бассейну 18 пунктов – уровни воды; 11 пунктов – осадки, 12 пунктов – температура воздуха (таблица 3.5). Сравним, как изменятся показатели качества методики прогноза для указанных выше пунктов при включении монгольских данных в обучающую выборку.

Таблица 3.2 – Характеристики точности прогнозов ежедневных уровней воды на реках Онон и Селенга за 2000-2010 гг

Заблаговременность прогноза, сутки	1			2			3			4			5			6			7		
	S/G	S	G	S/G	S	G	S/G	S	G	S/G	S	G	S/G	S	G	S/G	S	G	S/G	S	G
р.Онон - п.Верхний Ульхун	0,776	7,16	9,22	0,736	11,43	15,53	0,736	15,17	20,62	0,731	18,05	24,70	0,761	21,26	27,92	0,756	23,12	30,56	0,738	24,15	30,56
р.Онон - п.Бытэв	0,731	5,33	7,30	0,637	7,85	12,33	0,616	10,19	16,56	0,625	12,45	19,93	0,656	14,92	22,76	0,672	16,85	25,10	0,670	18,08	25,10
р.Онон - п.Чиндонт	0,657	2,55	3,88	0,558	3,93	7,03	0,482	4,73	9,81	0,436	5,34	12,25	0,416	5,99	14,38	0,429	6,97	16,23	0,464	8,29	16,23
р.Онон - п.Оловянная	0,806	4,42	5,49	0,752	7,06	9,38	0,726	9,26	12,76	0,704	11,03	15,66	0,684	12,46	18,21	0,677	13,86	20,47	0,681	15,31	20,47
р.Онон- п.Чирон	0,850	2,95	3,47	0,779	4,43	5,68	0,722	5,55	7,68	0,673	6,37	9,46	0,650	7,24	11,13	0,627	7,94	12,66	0,623	8,76	12,66
р.Селенга - п.Новоселенгинск	0,665	5,21	7,83	0,660	9,22	13,97	0,669	12,76	19,09	0,703	16,40	23,33	0,735	19,72	26,84	0,756	22,49	29,74	0,775	24,88	29,74
р.Селенга - п.Улан-Удэ	0,484	2,97	6,13	0,488	5,47	11,21	0,500	7,77	15,53	0,542	10,39	19,17	0,601	13,36	22,23	0,647	16,03	24,78	0,683	18,40	24,78
р.Селенга - п.Кабанск	0,713	20,59	28,89	0,692	20,94	30,28	0,663	21,26	32,04	0,647	21,92	33,90	0,649	23,16	35,68	0,670	25,03	37,33	0,665	25,81	37,33

Примечание - красный шрифт для критерия качества прогноза **0,70** и ниже.

Таблица 3.3.– Допустимые ошибки прогноза ежедневных уровней воды

Заблаговременность прогноза, сутки	Допустимые ошибки прогноза, см						
	1	2	3	4	5	6	7
р.Онон - п.Верхний Ульхун	6,2	10,5	13,9	16,6	18,8	20,6	22,1
р.Онон - п.Бытэв	4,9	8,3	11,2	13,4	15,3	16,9	18,2
р.Онон - п.Чиндонт	2,6	4,7	6,6	8,3	9,7	10,9	12,0
р.Онон - п.Оловянная	3,7	6,3	8,6	10,6	12,3	13,8	15,1
р.Онон- п.Чирон	2,3	3,8	5,2	6,4	7,5	8,5	9,5
р.Селенга - п.Новоселенгинск	5,3	9,4	12,9	15,7	18,1	20,0	21,7
р.Селенга - п.Улан-Удэ	4,1	7,6	10,5	12,9	15,0	16,7	18,2
р.Селенга - п.Кабанск	19,5	20,4	21,6	22,8	24,0	25,2	26,2

Таблица 3.4 – Характеристики точности прогнозов ежедневных уровней воды на реках Онон и Селенга за 2013 г., который не входит в обучающую выборку

Заблаговременность прогноза, день	1		2		3		4		5		6		7	
Характеристики точности	S/G	S	S/G	S	S/G	S	S/G	S	S/G	S	S/G	S	S/G	S
р.Онон - п.Верхний Ульхун	0,70	9,0	0,69	16,1	0,77	22,5	0,90	28,8	1,19	37,2	1,29	42,4	1,34	46,5
р.Онон - п.Бытэв	0,68	7,2	0,59	10,1	0,58	13,4	0,62	16,9	0,71	20,5	0,80	24,5	0,87	27,8
р.Онон - п.Чиндант	0,68	3,6	0,59	5,4	0,54	7,2	0,49	8,7	0,47	10,3	0,47	12,0	0,48	14,0
р.Онон - п.Оловянная	0,66	5,2	0,68	9,1	0,72	12,2	0,73	14,6	0,72	16,4	0,72	18,0	0,73	19,5
р.Онон - п.Чирон	0,80	4,0	0,73	6,1	0,67	7,5	0,64	8,4	0,59	9,3	0,56	9,9	0,54	10,7
р.Селенга - п.Новоселенгинск	0,68	7,0	0,64	12,4	0,76	20,1	0,94	28,7	1,08	35,7	1,18	41,1	1,23	45,3
р.Селенга - п.Улан-Удэ	0,44	3,3	0,43	6,4	0,48	10,0	0,67	15,5	0,79	20,9	0,90	26,4	1,05	31,2
р.Селенга - п.Кабанск	0,48	3,4	0,40	5,2	0,52	9,6	0,58	13,0	0,70	17,3	0,59	18,2	0,90	26,5

Примечание - красный шрифт для критерия качества прогноза **0,65** и ниже

Таблица 3.5 – Пункты наблюдений в бассейне р. Селенги

Пункты наблюдений за уровнями воды		Пункты наблюдений за осадками (х) и температурой воздуха (t)		
Россия	Россия и Монголия	Россия	Монголия	
р.Селенга-Усть-Кяхта р.Джида - Хамней р.Чикой -Гремячка р. Чикой - Поворот р.Селенга-Новоселенгинск р.Селенга-Улан-Удэ р. Хилок - Малета р. Уда - Улан-Удэ р.Курба-Новая Курба р. Селенга - Кабанск	р.Селенга-Усть-Кяхта р.Джида - Хамней р.Чикой -Гремячка р. Чикой -Поворот р.Селенга-Новоселенгинск р.Селенга-Улан-Удэ р. Хилок -Малета р. Уда -Улан-Удэ р.Курба-Новая Курба р. Селенга -Кабанск р. Туул - Улан Батор р.Хануй-Эрдэнмандал р.Идэр-Тосонцэнгэл р.Орхон-Хархорин р.Селенга-Хаялгант р.Орхон-Орхон р.Ероо-Ероо р.Селенга-Сухэ-Батор	Кяхта, х Красный Чикой, х Улан Удэ, х Кабанск, х Кяхта, t Красный Чикой, t Улан Удэ, t Кабанск, t	Кяхта, х Красный Чикой х Улан Удэ, х Кабанск, х Хануй, х Идер, х Туул, х Хархорин, х Халгант, х Орхон, х Еро, х	Кяхта, t Красный Чикой, t Улан Удэ, t Кабанск, t Хануй, t Идер,t Туул, t Хархорин, t Халгант, t Орхон, t Ероо, t Сухэ-Батор, t

В таблице 3.6 приведены результаты оценки качества методики для различной заблаговременности прогноза.

На ход уровней в нижнем створе (Кабанск) при заблаговременности прогноза 1-7 суток основное влияние оказывает приток воды с российской части водосбора р. Селенги. По этой причине качество методики при учете монгольских данных улучшается незначительно. **Однако, для пунктов, расположенных выше по течению, критерий качества прогноза для заблаговременности 3-4 суток различается уже на 0.10 и выше, что свидетельствует о повышении точности прогноза при использовании монгольских данных.**

Таким образом, в процессе дальнейшего развития сотрудничества России и Монголии целесообразно предусмотреть обмен гидрометеорологической информацией, разработку методов прогнозов и выпуск прогнозов в режиме оперативного обслуживания для всех заинтересованных сторон. Это позволит повысить уровень гидрометеорологической безопасности населения и экономики наших стран в предстоящий многоводный период, поскольку с паводками и половодьями нередко связаны опасные наводнения.

Таблица 3.6 – Критерий качества $\frac{\sigma_{\Delta}}{\sigma}$ прогноза ежедневных уровней воды

Заблаговременность, сутки	1	2	3	4	5	6	7
р. Селенга – г. Кabanск							
По наблюдениям пунктов на территории России	0.582	0.495	0.476	0.494	0.497	0.515	0.519
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0.536	0.461	0.435	0.441	0.436	0.460	0.480
р. Селенга – г. Улан-Удэ							
По наблюдениям пунктов на территории России	0.630	0.585	0.544	0.569	0.607	0.616	0.614
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0.611	0.535	0.459	0.467	0.520	0.543	0.574
р. Селенга – г. Новоселенгинск							
По наблюдениям пунктов на территории России	0.768	0.727	0.715	0.727	0.726	0.731	0.726
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0.710	0.638	0.603	0.616	0.640	0.670	0.710

4 Прогнозы максимальных уровней воды на затороопасных участках рек

4.1 Физические основы прогнозов

В основу физико-статистических моделей долгосрочного прогноза максимальных уровней воды с участием заторов льда положены исследования Л. Г. Шуляковского, показавшего еще в первой половине прошлого столетия возможность использования в кратко- и среднесрочных прогнозах регрессионных моделей [16]. В Сибири накоплен положительный опыт применения различных гидрометеорологических характеристик в регрессионных моделях *долгосрочного прогноза* максимальных уровней весеннего половодья на реках бассейнов Оби, Енисея и Лены (исследования Д.А. Буракова, В.Ф. Космаковой и др. [7 - 11]). Репрезентативность отобранных из физических соображений предикторов проверяется на основе корреляции с максимальными уровнями воды, с применением пошаговой регрессии. В расчетах использовались наблюдений за последние 30 – 50 лет.

Атмосферные процессы и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и прибыли воды в реках носят инерционный характер, т.е. начальные тенденции их развития характеризуют последующий ход вскрытия реки, включая образование и мощность заторов льда. Согласно [1, 12], весеннее потепление и сроки вскрытия рек Сибири определяются главным образом тем, возникает ли в марте над этой территорией юго-западный и западный перенос воздушных масс, обуславливающий общее потепление, или сохраняется восточносибирский антициклон с гребнями, направленными на запад и северо-восток. Циркуляционные «предвестники» раннего или позднего весеннего потепления проявляются еще в феврале-марте. Температура воздуха в марте (декадная, месячная), – может приближенно характеризовать тип весны. Например, при низкой температуре марта-начала апреля более вероятна холодная погода в первой половине апреля и последующее интенсивное потепление в конце апреля – начале мая, усиливающее концентрацию весеннего половодья. Теплое начало марта чаще сопровождается растянутым половодьем.

Максимальные уровни воды формируются под влиянием притока воды в русловую сеть с одной стороны, и факторов, определяющих образование шуголедяных «пробок» в русле – с другой. Конкретный набор предикторов и вид регрессионных уравнений индивидуальны для каждого участка реки в связи с различием условий образования заторов льда. Подчеркнем, что все используемые характеристики – это комплексные показатели

взаимодействия атмосферы, бассейна и русла. Выделить индивидуальную степень их влияния в общем физическом процессе не всегда удастся.

Объем и интенсивность притока воды в русловую сеть определяются запасами снега перед началом снеготаяния и весенними осадками, а также факторами, влияющими на интенсивность снеготаяния.

Раннее наступление тепла в верхнем течении реки, по сравнению с участком среднего и нижнего течения, способствует развитию заторного характера вскрытия в среднем и нижнем течении. Подобные условия характерны для рек, текущих с юга на север.

Интенсивность последующего подъема уровня воды косвенно связана с его подъемом за предшествующий отрезок времени.

Наконец, продолжительность осеннего ледохода, максимальный уровень в начале ледостава, толщина ледяного покрова характеризуют наличие шуголедяных «пробок» в русле.

Разработанные методики учитывают специфику формирования максимальных уровней воды, например, в нижнем бьефе высоконапорной Красноярской ГЭС, для заболоченных рек Западно-Сибирской равнины, для рек гонных районов южной Сибири и Среднесибирского плоскогорья. Репрезентативность отобранных из физических соображений предикторов проверяется на обучающей выборке с применением пошаговой регрессии, и уточняется с помощью последующего многовариантного подбора на основе корреляции с максимальными уровнями воды.

4.2 Прогностические зависимости для прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Западной и Средней Сибири

4.2.1 Прогнозы максимального уровня весеннего половодья р. Подкаменная Тунгуска – пос. Кузьмовка

Это одна из крупных рек рассматриваемого региона, расположенная в пределах Средне-Сибирского плоскогорья, в зоне средней тайги и многолетнемерзлых пород, с преимущественно снеговым питанием. Река стекает с приподнятой юго-восточной части плоскогорья (Ангарский кряж), далее течет на северо-запад по возвышенному Тунгусскому плато, впадая в Енисей в районе 61 град. северной широты. Длина 1865 км, площадь бассейна 240 тыс. км². Высоты 200-600 м занимают более 90% площади водосбора.

Средние даты начала половодья в бассейне р. Подкаменной Тунгуски приходятся на первую декаду мая. Вскрытие происходит в среднем 11-15 мая, в конце мая река обычно очищается ото льда. Ледоход длится 5-8 дней и часто сопровождается заторами льда. За

время половодья, проходящего в виде одной мощной волны, по реке проходит 65-70% общего объема годового стока. Пик половодья наступает во второй половине мая - в начале июня. Общая продолжительность половодья меняется от 40 до 80 дней. Средняя продолжительность ветви подъема - 16 дней, ветви спада - 36 дней.

Амплитуда колебания уровня воды Подкаменной Тунгуски постепенно увеличивается к устью. На участке ее верхнего течения у фактории Чемдальск, ее величина равна 7.5 м, в среднем течении 13 - 15 м (у фактории Усть-Камо 13-14 м), в нижнем течении - 15 - 20 м. Образование заторов льда – явление нередкое. Почти везде наибольший подъем уровней воды обусловлен формированием заторов льда.

Средний расход воды возрастает от 100 - 120 куб.м/с в верхнем течении до 1700 - 1800 куб.м/с в нижнем. Максимальные расходы воды достигают: у фактории Чемдальск - 2530 куб.м/с, в среднем течении у с.Байкит – 25300 куб.м/с, в устье у пос.Кузьмовка до 41000 куб.м/с. Большие значения максимальных расходов воды обусловлены высокой дружностью таяния снега и направлением течения реки (с юго-востока на северо-запад), благодаря чему происходит сложение паводочных волн по длине реки.

Среднегодовое количество осадков в виде снега – 10 апреля, может варьировать от последней декады марта до первой декады мая. Наблюдается увеличение нормы запасов воды в снеге в направлении с востока на запад, что объясняется наличием в западной части территории наиболее возвышенного Енисейского кряжа. Величина максимального снегозапаса на ГМС Кузьмовка (высота $H=60$ м), расположенной в устьевой части реки - 279 мм, а на ГМС Ванава ($H = 259$ м) в верхнем течении – лишь 122 мм.

Зависимости для максимальных уровней воды ($H_{\max}$) от запасов снега и весенних осадков р. Подкаменная Тунгуска, как и для других рек Средней Сибири, характеризуются низкими коэффициентами корреляции (0.30 – 0.40). Дело в том, что максимальные уровни воды формируются с участием ледово-заторных явлений. Например, на р. Подкаменная Тунгуска – пос. Кузьмовка за период с 1971 по 2013 гг в 45% случаев максимальный уровень наблюдался при заторе льда. Средняя дата его наступления – 23 мая; крайние - 28 апреля (1997), 7 июня (1980). Наибольший максимальный уровень был отмечен в 1992, 2001 гг. (1822 см), самый низкий в 1995 г (958 см). В 1959 году максимальный уровень воды в створе пос. Кузьмовка достиг наивысшей отметки за весь период наблюдений: $H = 2123$ см, что превысило среднюю величину высшего уровня половодья в 2,5 раза.

Рассмотрим методику прогноза максимального уровня воды $H_{\max}$ р. Подкаменная Тунгуска – пос. Кузьмовка (рисунок 4.1). Уравнение для прогноза имеет вид

$$H_{\max} = b + \sum_{i=1}^{14} a_i X_i. \quad (4.1)$$



Рисунок 4.1 - Схема бассейна р. Подкаменная Тунгуска (интернет-ресурс: ru.wikipedia.org > [Википедия](http://ru.wikipedia.org) > [Подкаменная Тунгуска](http://ru.wikipedia.org))

Обозначения переменных в этом уравнении и характеристики его точности приведены в таблице 4.1. Рассмотрим смысловую нагрузку предикторов, использующихся для долгосрочного прогноза.

В уравнение (4.1) входят запасы воды в снежном покрове в различных пунктах и в разные моменты времени с коэффициентами регрессии $a_1, \dots, a_5$. Сгруппируем их в виде следующего выражения: $\Delta S = (a_1 S_1 - |a_2| S_2) + (a_4 S_4 - |a_3| S_3) + (a_6 S_6 - |a_5| S_5)$, в котором коэффициенты со знаком минус записаны по абсолютной величине, а знак минус вынесен перед соответствующим произведением $|a_i| S_i$. Величина ΔS характеризует изменения за соответствующие интервалы времени запаса снега в соответствующих пунктах (Муторай, Вельмо, Байкит), обусловленные снеготаянием и выпадением осадков. Следовательно, ΔS является показателем развития весенних процессов снеготаяния и выпадения осадков во времени и в пространстве.

Члены уравнения (4.1), включающие изменения уровней воды (H) в Кузьмовке и Байките (минимальный в марте, 31 марта, 10 апреля) – характеризуют тенденции в ходе уровней воды за соответствующие периоды (таблица 4.1), являясь интегральными показателями развития процесса вскрытия. Они отражают взаимосвязь хода весенней погоды

с процессом поступления талой воды в русловую сеть, и, через изменения уровней воды, также характеризуют динамику ледовой обстановки в русле.

Таблица 4.1 – Регрессионная статистика и параметры уравнения регрессии для прогноза максимального уровня воды р. Подкаменная Тунгуска – фактория Кузьмовка

Множественный R	0,933		
R-квадрат	0,871		
Нормированный R-квадрат	0,806		
Стандартная ошибка	98,6		
Наблюдения	43		
Переменные, входящие а уравнение регрессии	Коэффициенты уравнения регрессии		t-статистика
	обозначение	величина	
Y– пересечение – свободный член уравнения регрессии	b	1242,2	6,20
Предикторы уравнения X_i			
S_1 –максимальный запас воды в снежном покрове (Муторай), обычно наблюдается в апреле	a_1	13,35	7,87
S_2 – снегозапас 31 марта, Муторай	a_2	-11,63	-5,61
S_3 – наибольший запас воды в снежном покрове, который наблюдался в марте, Вельмо	a_3	-2,913	-3,38
S_4 – снегозапас 10 апреля Вельмо	a_4	1,596	2,15
S_5 – наибольший запас воды в снежном покрове, который наблюдался в марте, Байкит	a_5	-3,571	-3,33
S_6 – запас воды в снежном покрове 10 апреля, Байкит	a_6	1,212	1,20
Хзим – сумма осадков за октябрь- март, Ванавара	a_7	4,728	3,530
(Н 10.04- Н 31.03) Кузьмовка – изменение уровней воды за соответствующий период (10.04 – 31.03)	a_8	-26,08	-4,003
(Н 31.03-Н min 03) Кузьмовка – разница уровней воды, от минимального в марте до 31 марта	a_9	14,82	4,4371
(Н 10.04 - Н31.03) Байкит - (Н 31.03- Н20.03) Байкит – разница изменений уровня воды за соответствующие периоды	a_{10}	-5,988	-4,474
Qср VIII+IX+X –сумма расходов воды за август октябрь предшествующего года, Кузьмовка	a_{11}	0,1057	3,2925
(Д _{ледст} Кузьмовка - Д _{ледст} Ванавара) – разница дат установления ледостава в пунктах Кузьмовка и Ванавара	a_{12}	-4,717	-1,95039
Qср XII – средний расход воды в декабре, Кузьмовка	a_{13}	-1,108	-2,597
$t_{октябрь}^0$, Ванавара – средняя температура воздуха в октябре, Ванавара	a_{14}	-19,24	-2,241

Сумма расходов воды за август-октябрь предшествующего года в Кузьмовке характеризует осеннее увлажнение бассейна в предшествующую осень, и, вместе с такими предикторами, как расход воды в декабре, разница дат установления ледостава в пунктах Кузьмовка и Ванавара и средняя температура в октябре (Ванавара) отражает развитие

осенне-зимней ледовой обстановки в русле, в том числе образование заторно-зажорных скоплений льда. Сумма осадков за октябрь-март (Хзим, Ванавара, таблица 4.1) характеризует количество накопившегося снега за холодный период, дополняя учтенные в таблице 4.1 данные о запасах снега.

Методики прогноза максимальных уровней весеннего половодья при участии в их формировании заторов льда почти исключительно опираются на регрессионный или дискриминантный анализ, что связано с трудностями физико-математического описания процессов образования заторно-зажорных явлений, их многофакторности, зависимости от будущих погодных условий, предсказание которых с необходимой заблаговременностью и точностью пока не представляется возможным. Большое количество предикторов, включаемых в регрессионное уравнение, приводит к снижению надежности определения коэффициентов регрессии.

Целесообразность включения того или иного предиктора должна подтверждаться не только общими соображениями о его участии в формировании максимальных уровней воды, но и соответствующими значениями t-статистик, равных отношению коэффициентов регрессии к средним квадратичным ошибкам их определения (табл. 4.1). Но, главное, методика прогноза должна выдержать проверку на независимом материале наблюдений. Рассматриваемая методика выдержала этот экзамен. За шесть лет ее оперативного использования в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» ошибки прогноза не вышли за пределы допустимой (табл. 4.2). По мере накопления данных наблюдений подобные методики следует уточнять, пересчитывая коэффициенты уравнения.

Таблица 4.2. – Результаты прогноза максимального уровня у р. Подкаменная Тунгуска – факт. Кузьмовка (допустимая ошибка 155 см)

Год	$H_{\max}$ Кузьмовка- (измеренный)	Прогно з	Ошибк а
2008	1454	1437	17
2009	1598	1599	-1
2010	1658	1519	139
2011	1500	1551	-51
2012	1242	1249	-7
2013	1402	1523	-121

4.2.2 Река Обь– г. Нижневартовск

Река Обь– г. Нижневартовск (1713 км от устья и около 500 км выше впадения Иртыша). Долина реки в районе водомерного поста трапецеидальная, шириной 20 - 22 км.

Правый склон долины пологий, высотой до 20м, левый умеренно крутой, высотой до 35 м. Дно долины пойменное.

Пойма в основном левобережная, шириной до 20 км, изрезана протоками, старицами, озерами, сложена песчано-илистыми грунтами, покрыта луговыми травами и кустарником. По левобережной части поймы протекает крупная протока Чехлоней и малые (Большой Пасол, Малый Пасол и др.).

Вода выходит на пойму при уровне 800 см над уровнем нуля графика. При уровне 1020 см пойма затопляется полностью от левого до правого коренного берега.

Русло реки умеренно извилистое, деформирующееся. Правый берег крутой, местами обрывистый, высотой 13-14м, застроен г. Нижневартовском. Левый – пологий, высотой 9 - 10м. Оба берега сложены песчано-илистыми грунтами.

Максимальные уровни р. Оби у Нижневартовска (рисунок 4.2) формируются в результате сложения различных типов режима, свойственных географическим зонам, через которые она протекает. В верхнем течении Оби во время половодья подъем уровня происходит дважды: первый обусловлен таянием снега на равнине, второй – таянием снега в горах. Ниже г. Новосибирска пики постепенно сглаживаются, и от г. Колпашево ход уровней половодья имеет вид плавной одномодальной кривой, характерной для равнинных рек таежной зоны.



Рисунок 4.2 - Временной ход максимальных уровней воды у г. Нижневартовска

В районе Нижневартовска продолжительность подъема уровней воды увеличивается до 40 - 50 дней, во второй половине июля начинается медленный спад уровней воды, который продолжается до конца августа при общей продолжительности половодья 120 - 130 дней. Здесь Обь вскрывается в среднем в конце третьей декады мая. Затопы при вскрытии наблюдались в 1983, 1999, 2000, 2001 и 2003 гг., заторные уровни были ниже максимальных

уровней за половодье. Наивысшие уровни у Нижневартовска проходят в конце первой – начале второй декады июня (таблица 4.3).

Как и для р. Оби у г. Барнаула, 2012 год оказался для р. Оби у г. Нижневартовска экстремально низким по водности и высоте подъема половодья.

Таблица 4.3 - Характеристики осеннего ледохода и максимального уровня воды р. Обь – г. Нижневартовск (1972-2012 гг.)

Характеристика	Дата весеннего ледохода	Дата начала осеннего ледохода	Дата начала ледост ава	Продолжи тельность осеннего ледохода, дни	Н, см мах весеннего половодь я	Дата наступ- ления Н мах
Средние	10.V	27.X	16.XI	9	852	11.VI
Максимальные (поздние)	<u>22.V</u> 1998	<u>18.XI</u> 2011	<u>20.XI</u> 2011	<u>30</u> 1985	<u>1071</u> 1979	<u>5-9.VII</u> 1975,1991, 1998,2010
Минимальные (ранние)	<u>16.IV</u> 1995	<u>1.X</u> 1991	<u>19.X</u> 1974	<u>1</u> 1986,2008	<u>542</u> 2012	<u>21.IV</u> 2012

Основные предикторы для прогноза максимального уровня у г. Нижневартовска следующие:

- показатели снегонакопления в бассейне;
- минимальные зимние уровни воды выше и ниже расчетного пункта;
- уровня воды при появлении ледовых образований;
- уровни воды на 10 марта и 10 апреля в пунктах наблюдений, а также температура воздуха в марте и апреле, характеризующие динамику развития весенних процессов.

Уравнения для прогноза имеют вид:

– прогноз в конце марта

$$H_{\text{Н-вар}} = (S_{1 \text{ Н-вар}} + 1,608 * X) + (\Delta H_1 + \Delta H_2) - (\Delta H_3 - \Delta H_4) - \Delta t_1 + 395.982 \quad (4.2)$$

показатели точности: $R = 0.937$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.369$;

– прогноз в конце апреля

$$H_{\text{Н-вар}} = (S_{2 \text{ Н-вар}} + 1,623 * X) + (\Delta H_{11} + \Delta H_{12}) - (\Delta H_{13} - \Delta H_{14}) - \Delta t_{11} - 3,393 * t_{IV} + 404,136 \quad (4.3)$$

показатели точности: $R = 0.948$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.359$;

Обозначения переменных уравнений (4.2) и (4.3) представлены в таблице 4.4.

Результаты прогнозов за 2008 - 2013 гг. даны в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Обозначения переменных в уравнении (4.2) и (4.3)

Обозначение	Смысловое значение
S_1 Н-вар, S_2 Н-вар, X	Показатели накопления, где S_1 Н-вар= $1.984*S_1+1.045*S_2$; S_2 Н-вар= $2.165*S_1+1.069*S_2$; S_1 – максимальный запас воды в снеге, Колпашево; S_2 – максимальный запас воды в снеге, Молчаново. X - сумма осадков за январь, февраль, март, Степановка.
$(\Delta H_1 + \Delta H_2)$; $(\Delta H_{11} + \Delta H_{12})$	$\Delta H_1=(0,764*H_1-3,003*H_2)$; $\Delta H_2=(3,886*H_3-1,857*H_4)$; $\Delta H_{11}=(0,644*H_1-2,544*H_2)$; $\Delta H_{12}=(3,493*H_3-1,653*H_4)$, где H_1 - минимальный зимний уровень, р.Обь – Сытомино; H_2 - минимальный зимний уровень, р.Обь -Александровское; H_3 - уровень воды на 10 марта, Сытомино; H_4 - уровень воды на 10 марта, Александровское.
$(\Delta H_3 - \Delta H_4)$; $(\Delta H_{13} - H_{14})$	$\Delta H_3=0,430*(H_5-H_6)$; $\Delta H_4=(1,498*H_6-1,122*H_7)$; $\Delta H_{13}=0,395*(H_5-H_6)$; $\Delta H_{14}=(1,271*H_6-0,989*H_7)$, где H_5 - уровень воды на 10 апреля, р.Обь – Сытомино; H_6 – то же р.Обь - Каргасок; H_7 -то же р.Обь -Колпашево.
Δt_1 Δt_{11} t_{IV}	$\Delta t_1=(21,556*t_1-14,469*t_2)$; $\Delta t_{11}=(19,991*t_1-12,911*t_2)$, где t_1 = среднемесячная температура воздуха за март, Барнаул; t_2 = среднемесячная температура воздуха за март, Александровское; t_{IV} -среднемесячная температура воздуха за апрель, Александровское.

Таблица 4.5 – Результаты прогноза максимальных уровней воды р. Оби у г. Нижневартовска

р. Обь – г. Нижневартовск (доп.ош -58 см)					
Год	Факт	Прогноз по формуле 4.2	Ошибка	Прогноз по формуле 4.3	Ошибка
2008	836	802	34	809	27
2009	778	798	-20	785	-7
2010	883	888	-5	883	0
2011	816	840	-24	819	-3
2012	542	592	-50	599	-57
2013	936	897	39	895	41

4.2.3 р. Обь – с. Александровское

Александровское расположено в 1830 км от устья, площадь водосбора 765 000 км². Сроки наступления $H_{A \max}$ достаточно растянуты (конец апреля – начало июля). Крайние сроки наступления $H_{A \max}$ – 21 апреля (2012 г), 5 июля (1975 г).

Уравнения для прогноза имеют вид:

– прогноз в конце марта

$$H_{A \max} = (1.157 \cdot S_{1A} + 0.582 \cdot X_1 + 0.158 \cdot X_2) + 1.245 \cdot h_A + (\Delta H_1 + \Delta H_2) + 0.407 \cdot H_1 + \Delta H_3 + 1.198 \cdot \Delta D_1 - 1.984 \cdot \Delta D_2 - 5.683 \cdot t_1 + 468.504 \quad (4.4)$$

показатели точности: $R = 0.913$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.418$;

– прогноз в конце апреля

$$H_{A \max} = (0.987 \cdot S_{1A} + 0.642 \cdot X_1 + 1.189 \cdot X_2) + 1.123 \cdot h_A + (\Delta H_1 + \Delta H_2) + 0.478 \cdot H_1 + \Delta H_3 + 2.787 \cdot \Delta D_1 - 2.051 \cdot \Delta D_2 - 5.620 \cdot t_1 - 6.976 \cdot t_2 + 457.470 \quad (4.5)$$

показатели точности: $R = 0.942$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.346$. Описания переменных и результаты прогнозов приведены в таблицах 4.6, 4.7.

Таблица 4.6 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (4.4, 4.5)

Обозначения	Смысловое значение	t - статистика
1	2	3
$S_{1A}; X_1; X_2$	Показатели снегонакопления, где $S_A = 0.623 \cdot S_1 + 0.440 \cdot S_2 + 0.537 \cdot S_3 + 0.323 \cdot S_4$; X_1 – сумма осадков за январь, февраль, март, Колпашево; X_2 – сумма осадков за март, Томск; S_1 – максимальный запас воды в снеге, Колпашево; S_2 – максимальный запас воды в снеге, Парабель; S_3 – максимальный запас воды в снеге, Томск; S_4 – максимальный запас воды в снеге, Молчаново	
h_A	$h_A = 0.878 \cdot h_1 + 0.669 \cdot h_2 + 1.115 \cdot h_3$, где h_1, h_2, h_3 – максимальная толщина льда в районе Александровского, Каргаска, Молчаново	
$\Delta H_1; \Delta H_2; H_4$	$(\Delta H_1 + \Delta H_2)$, где $\Delta H_1 = (0.714 \cdot H_1 - 0.761 \cdot H_2)$; $\Delta H_2 = (0.3 \cdot H_2 - 0.478 \cdot H_3)$, где H_1 – минимальный зимний уровень, р.Обь – Александровское; H_2 – минимальный зимний уровень, р.Обь – Каргасок; H_3 – минимальный зимний уровень, р.Обь – Колпашево; H_4 – минимальный зимний уровень, р.Обь – Молчаново; Комплексный показатель неоднородности увлажнения (промерзания) участков бассейна перед половодьем	
ΔH_3	$\Delta H_3 = (0.643 \cdot H_5 - 0.634 \cdot H_6)$, где H_5 – уровень воды на момент начала ледовых образований, р.Обь – Александровское; H_6 – уровень воды на момент начала ледовых образований, р.Обь – Каргасок; Комплексный показатель увлажнения участков бассейна осенью, перед ледоставом	

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3
$\Delta D_1; \Delta D_2$	ΔD_1 – разность сроков установления ледостава Обь -Каргасок и Обь – Александровское; ΔD_2 - разность сроков установления ледостава Обь -Колпашево и Обь -Каргасок	
$t_{III}; t_{IV}$	t_{III} - среднемесячная температура воздуха за март, Барнаул; t_{IV} -среднемесячная температура воздуха за апрель, Александровское. Комплексный показатель характера весны	

В 2012 году во всем бассейне Оби максимальные уровни воды в период половодья оказались экстремально низкими за весь период наблюдений (40 - 50 лет). Анализируя графики многолетнего хода максимальных уровней воды (рисунок 4.2, 4.3) можно заключить, что в Среднем и Нижнем течении р. Оби в 2012 году максимальные уровни воды оказались почти на 2 метра ниже самых низких максимумов за предшествующий период инструментальных наблюдений. Аналогичная ситуация на р. Томи (г. Томск и др.). На крупных притоках Оби (Чулым, Кеть) контрасты не столь велики (рисунок 4.3).

Таблица 4.7. – Результаты прогноза максимального уровня у с. Александровское (допустимая ошибка 58 см)

Год	H_{A-max} (измеренный)	Уравнение 4.4		Уравнение 4.5	
		прогноз	ошибка	прогноз	ошибка
2008	852	833	19	805	47
2009	813	817	-4	849	-36
2010	942	934	8	930	12
2011	835	829	6	886	-51
2012	557	705	-148	720	-163
2013	983	1041	-58	965	18

4.2.4 р. Обь – с. Молчаново, с. Белогорье, пос. Октябрьский

Молчаново расположено в 2557 км от устья, площадь водосбора 343 000 км². Сроки наступления H_{Mmax} достаточно растянуты (конец апреля – начало июня). Крайние сроки наступления H_{Mmax} – 21 апреля (1982 г.), 6 июня (2010 г.). Уравнения для прогноза имеют вид:

р. Обь - с. Молчаново, в конце марта:

$$H_{Mmax} = (S_{1M} + 1,008 * X_1) + (5,862 * h_K - 2,616 * h_M) + \Delta H_1 - \Delta H_2 + 0,030 * Q_{IX} + 536.694 \quad (4.6)$$

Показатели точности: $R = 0.915$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.516$;

– прогноз в конце апреля

$$H_{Mmax} = (S_{2M} + 1,162 * X_1 + 0,485 * X_2) + (5,925 * h_K - 2,640 * h_M) + \Delta H_3 - \Delta H_4 + 0,034 * Q_{IX} + 523,3 \quad (4.7)$$

Показатели точности: $R = 0.911$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.530$.

Описания переменных и результаты прогнозов приведены в таблицах 4.8, 4.9.

Прогноз максимального уровня у с. Молчаново не оправдался в 2012 г, который оказался экстремально низким (рисунок 4.3.). Аналогичная ситуация наблюдается для р. Оби у с. Белогорье (таблица 4.10).

В таблице 4.11 приведены результаты прогноза для р. Оби у пос. Октябрьский, расположенном в нижнем течении Оби. Методика прогноза включает практически те же предикторы, что и для Белогорья. Благодаря влиянию боковой приточности, в 2012 г низкий уровень воды у пос. Октябрьский не оказался настолько экстремальным. Прогнозы по этому пункту оправдались за все рассмотренные годы.

Таблица 4.8.– Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (4.6), (4.7)

Обозначение	Смысловое значение	t – статистики
1	2	3
$S_{1M}; S_{2M}$	Показатели снегонакопления, где $S_{1M} = 1,007 * S_1 + 1,444 * S_2 + 0,605 * S_3 + (0,571 * S_5 - 1,107 * S_4)$; $S_{2M} = 1,485 * S_2 + 0,600 * S_3 + (0,646 * S_4 - 0,403 * S_5)$, где S_1 – максимальный запас воды в снеге, Молчаново; S_2 – максимальный запас воды в снеге, Первомайское; S_3 – запас воды в снеге на 31 марта, Парабель; S_4 – запас воды в снеге на 20 марта, Молчаново; S_5 – запас воды в снеге на 31 марта, Молчаново;	
$X_1; X_2$	X_1 – сумма осадков за март, Томск; X_2 – сумма осадков за апрель, Томск;	
$h_{1M}; h_{2M}$	$h_{1M} = 5,862 * h_2 - 2,616 * h_1$; $h_{2M} = 5,925 * h_2 - 2,640 * h_1$, где h_1, h_2 – максимальная толщина льда в районе Молчаново, Парабель соответственно	
$\Delta H_1; \Delta H_3$	$\Delta H_1 = (0,638 * H_1 - 1,147 * H_2)$; $\Delta H_3 = (0,728 * H_1 - 1,000 * H_2)$, где H_1 – уровень воды на 10 марта, р.Обь – Молчаново; H_2 – уровень воды на 10 марта, р.Обь – Никольское; H_3 – уровень воды на 10 марта, р.Обь – Колпашево; H_4 – уровень воды на 20 марта, р.Обь – Колпашево; Комплексный показатель неоднородности увлажнения (промерзания) участков бассейна перед половодьем	

Продолжение таблицы 4.8

1	2	3
Q_{IX}	Q_{IX} – среднемесячный расход воды, Обь –Колпашево, показатель осеннего увлажнения бассейна	
t_{III}; t_{IV}	t_{III} - среднемесячная температура воздуха за март, Барнаул; t_{IV} - среднемесячная температура воздуха за апрель, Александровское. Комплексный показатель характера весны	

Таблица 4.9 – Результаты прогноза максимального уровня р. Оби – с. Молчаново (допустимая ошибка 47 см)

Год	H_{м-мах} (измеренный)	Уравнение 4.6		Уравнение 4.7	
		прогноз	ошибка	прогноз	ошибка
2008	852	744	-8	751	-15
2009	813	802	7	800	9
2010	942	949	-35	962	-48
2011	835	747	70	766	51
2012	557	622	-155	635	-168
2013	983	910	3	918	-5

Таблица 4.10 – Результаты прогноза максимального уровня р. Оби – с. Белогорье

р. Обь. – с. Белогорье (допустимая ошибка 65 см)			
Год	Факт	Прогноз	Ошибка
2008	1017	1051	-34
2009	923	1006	-83
2010	983	1014	-31
2011	925	923	2
2012	738	825	-87
2013	1037	980	57

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

Таблица 4.11 – Результаты прогноза максимального уровня у р. Оби – пос. Октябрьский

р. Обь- с. Октябрьское (допустимая ошибка 62 см)			
Год	Факт	Прогноз	Ошибка
2008	885	916	-31
2009	909	935	-26
2010	845	890	-45
2011	808	799	9
2012	661	707	-46
2013	887	839	48

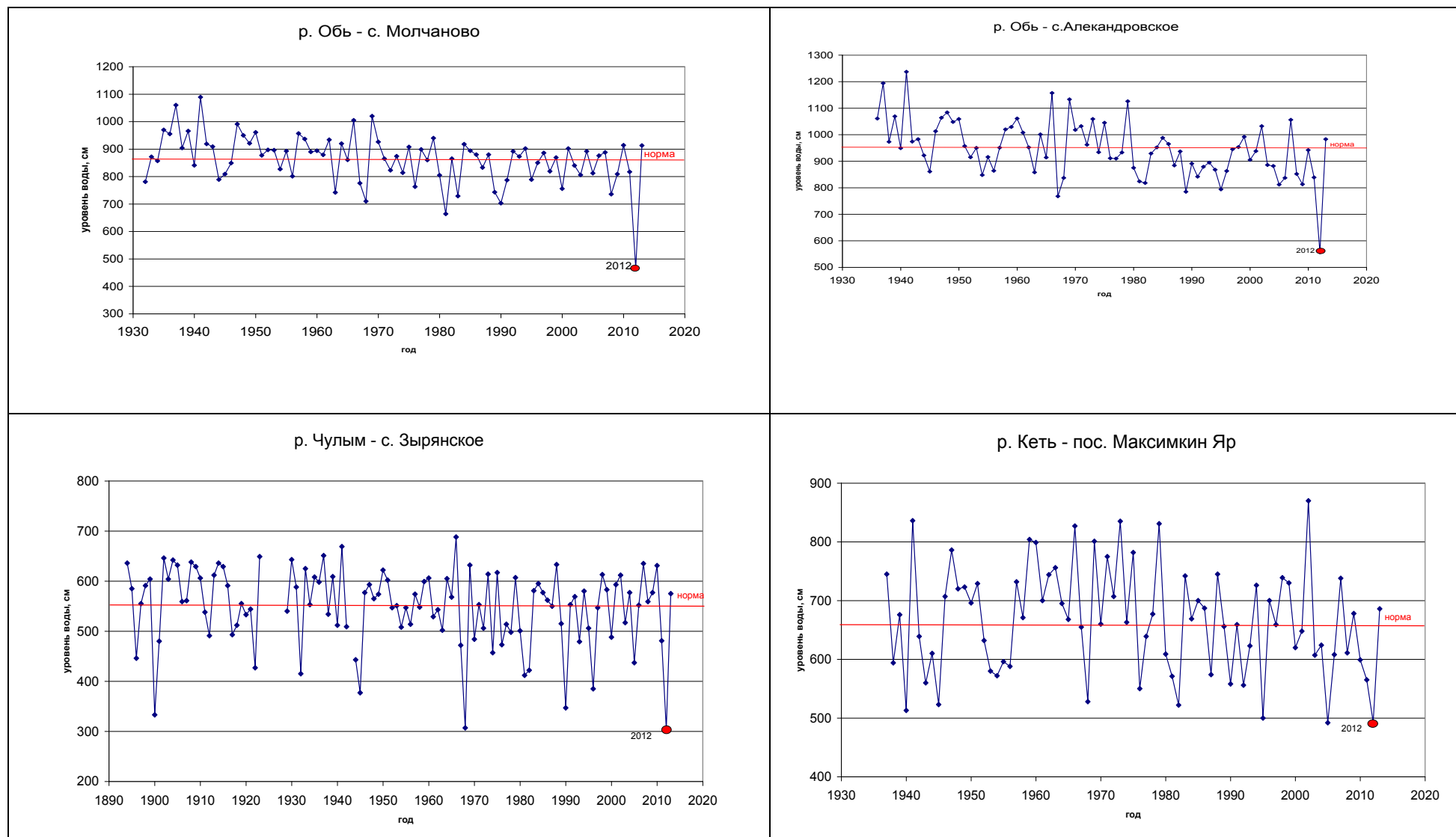


Рисунок 4.3 - Временной ход максимальных уровней воды у на средней Оби, Чулыме и Кети.

4.2.5 р. Чулым - с. Копьево

Река Чулым - правобережный приток реки Оби, образуется от слияния Белого и Черного Июса, берущих начало в горах Кузнецкого Алатау. Питание преимущественно снеговое. Площадь бассейна 134000 км², длина реки 1799 км, впадает в р. Обь на 2542 км.

В орографическом отношении вся территория бассейна р. Чулым до сел Копьево и Балахта может быть разделена на две части: горную и холмистую.

Горная часть бассейна представлена восточными и северо-восточными отрогами Кузнецкого Алатау, в неё входят бассейны рек Чёрный и Белый Июс, а также верхние части бассейнов левобережных притоков реки р. Урюп и р. Кия. Местность имеет сильнопересечённый высокогорный характер. Отдельные вершины в истоках рек Чёрный и Белый Июс достигают 1142 - 2178 м. Основная горная часть бассейна, за исключением переходной полосы от горного рельефа к холмистому, где она принимает лесостепной характер, поросла густым смешанным лесом и умеренно рассечена долинами рек. Обнажения коренных пород наблюдаются только по склонам долин и некоторым резко выступающим вершинам гор.

Холмистая часть бассейна представлена предгорьями Кузнецкого Алатау, Солгонским кряжем и хр. Арга. Вдоль долины реки Чулым холмистая местность распространяется далеко на север от Транссибирской ж/д магистрали. По морфологии рельефа она делится на крупно-холмистую, средне-холмистую и мелко-холмистую части. Поверхность здесь расчленена умеренно долины и ложбины неглубокие, склоны их в большинстве случаев пологие.

На большинстве рек рассматриваемой территории половодье проходит с апреля по июнь. Начало половодья в горах на высоте 1200 - 1500 м наступает на 10 - 20 дней позже, чем в предгорных районах.

Средняя дата начала половодья для равнинных и предгорных рек южных районов приходится на первую половину апреля. Чем севернее находится река, тем позже дата начала половодья. На фоне подъема и спада основной волны в зависимости от характера снеготаяния и выпадения ранних дождей может сформироваться от 1 - 2 до 3 - 4 пиков.

Весеннее половодье на р. Чулым обычно проходит двумя волнами. Первая волна обуславливает вскрытие реки. Она образуется за счет таяния снега в лесостепной и степной местности. Вторая волна образуется вследствие таяния снега в горах. Максимальные уровни воды часто приходятся на первую волну, чему в отдельные годы способствуют и заторы льда.

Уравнение для выпуска прогноза максимального уровня воды *р. Чулым у д. Копьево:*

$$H_{\text{мах Копьево}} = 0,202 \cdot S_{\text{Комм мах}} + 0,225 \cdot X_{\text{Неож IV}} + 0,146 \cdot X_{\text{Комм I-III}} + 0,724 \cdot D_{\text{Нен}} - 1,043 \cdot D_{\text{Бал}} + 243 \quad (4.8)$$

показатели точности:

коэффициент корреляции $R = 0,79$

критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,61$

допустимая ошибка $\delta = 25 \text{ см}$

оправдываемость на обучающей выборке $p = 86\%$

Таблица 4.12 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
$S_{\text{Комм мах}}$	Максимальный за зиму запас воды в снеге по ГМС Коммунар	4.0
$X_{\text{Комм I-III}}$	Сумма осадков за период апрель – март, ГМС Коммунар	2.6
$X_{\text{Неож IV}}$	Количество осадков в апреле, М Неожиданный	2.1
$D_{\text{Нен}}$	Дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, М Ненастная	2.5
$D_{\text{Бал}}$	Дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, М Балахта	-1.9

Результаты рассчитанных и фактических максимальных уровней воды весеннего половодья помещены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 - Рассчитанные и фактические значения максимальных уровней воды весеннего половодья *р. Чулым – д. Копьево* (допустимая ошибка прогноза 25 см)

Год	$H_{\text{мах факт, см}}$	$H_{\text{мах, см}}$ рассчитанный	Ошибка прогноза
1	2	3	4
1965	355		
1966	381	396	15
1967	288	296	8
1968	306	308	2
1969	392	383	-9
1970	388	344	-44
1971	326	341	15
1972	373	356	-17
1973	404	399	-5
1974	320	344	24

Продолжение таблицы 4.13

1	2	3	4
1975	392	373	-19
1976	282	317	35
1977	335	310	-25
1978	302	345	43
1979	404	393	-11
1980	320	312	-8
1981	288	301	13
1982	306	313	7
1983	306	316	10
1984	358	315	-43
1985	355	345	-10
1986	346	323	-23
1987	311	316	5
1988	308	332	24
1989	356	379	23
1990	350	342	-8
1991	313	321	8
1992	358	347	-11
1996	337	318	-19
1997	300	314	14
1998	312	324	12
1999	318	351	33
2000	326	306	-20
2001	370	349	-21
2002	345	349	4
2003	312	300	-12
2004	377	366	-11
2005	294	301	7
2006	321	337	16
2007	329	322	-7
2008	306	317	11
2009	343	333	-10
2010	348	301	-47
2011	299	318	19

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

За период авторских испытаний 2012 - 2013 гг. в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» ошибка прогноза не вышла за пределы допустимой (таблица 4.14).

Таблица 4.14 - Результаты прогноза максимального уровня р. Чулым – д. Копьево (допустимая ошибка 25 см)

Год	$H_{\max}$ Копьево- (наблюденный)	Прогноз	Ошибка
2012	269	282	13
2013	325	340	15

4.2.6 р. Чулым – пос. Балахта

Уравнение для выпуска прогноза (описание переменных в таблице 4.15):

$$H_{\text{мах Балахта}} = 0,245 \cdot S_{\text{Комм мах}} + 0,327 \cdot \text{Неож X IV} + 0,253 \cdot \text{Комм X I-III} + 1,004 \cdot \text{Нен D ч/з 0} - 1,276 \cdot \text{Бал D ч/з 0} + 283 \quad (4.9)$$

показатели точности:

коэффициент корреляции $R = 0,83$

критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,58$

допустимая ошибка $\delta = 30$ см

оправдываемость на обучающей выборке $p = 83\%$

Таблица 4.15 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
S Комм мах	Максимальный за зиму запас воды в снеге по М Коммунар	3.9
Комм X I-III	Сумма осадков за период апрель – март, М Коммунар	3.4
Неож X IV	Количество осадков в апреле, М Неожиданный	2.5
Нен D ч/з 0	Дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, М Ненастная	2.7
Бал D ч/з 0	Дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, М Балахта	-1.9

Результаты рассчитанных и фактических максимальных уровней воды весеннего половодья помещены в табл. 4.16.

Таблица 4.16 – Рассчитанные и фактические значения максимальных уровней воды весеннего половодья р. Чулым – пос. Балахта (допустимая ошибка прогноза 30 см)

Год	H мах факт, см	H мах, см рассчитанный	Ошибка прогноза
1	2	3	4
1965	434		
1966	495	503	8
1967	350	361	11
1968	351	382	31
1969	494	480	-14
1970	477	430	-47
1971	392		
1972	473	449	-24

Продолжение таблицы 4.16

1	2	3	4
1973	498	500	2
1974	390	430	40
1975	493	469	-24
1976	344	390	46
1977	396	382	-14
1978	383	433	50
1979	502	496	-6
1980	392	381	-11
1981	358	369	11
1982	390	386	-4
1983	399	391	-8
1984	387	389	2
1985	421	425	4
1986	460	397	-63
1987	393	392	-1
1988	414	405	-9
1989	454	474	20
1990	413	417	4
1991	378	395	17
1992	440	433	-7
1997	356	382	26
1998	406	404	-2
1999	417	439	22
2000	422	377	-45
2001	458	437	-21
2002	444	448	4
2003	395	372	-23
2004	470	466	-4
2005	353	370	17
2006	416	427	11
2007	427	400	-27
2008	396	394	-2
2009	425	412	-13
2010	436	371	-65
2011	384	387	3

За период 2012 - 2013 гг. в период авторских испытаний в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» ошибка прогноза не вышла за пределы допустимой (таблица 4.17).

Таблица 4.17– Результаты прогноза максимального уровня р. Чулым – пос. Балахта (допустимая ошибка 30 см)

Год	$H_{\max}$ Балахта- (наблюденный)	Прогноз	Ошибка
2012	нет данных	343	-
2013	403	430	27

4.2.7 р. Чулым - с. Зырянское

Уравнение для выпуска прогноза максимального уровня воды в марте:

$$H_{\text{махЗырянское}} = (1,685 \cdot S1 + 0,726 \cdot S2) + (0,962 \cdot Q1 - 0,697 \cdot Q2 - 0,380 \cdot Q3 + 0,152 \cdot Q4 + 0,2206 \cdot Q5) + (2,786 \cdot H1 - 1,969 \cdot H2 + 3,282 \cdot H3 - 3,821 \cdot H4) + 0,899 \cdot XI + 385,389 \quad (4.10)$$

Показатели точности:

коэффициент корреляции $R=0,899$

критерий качества прогноза $S/\sigma=0,48$

допустимая ошибка $b = 50$ см

оправдываемость на обучающей выборке $p=79\%$

Уравнение 1 для уточнения прогноза максимального уровня воды в марте-апреле:

$$H_{\text{махЗырянское}} = (1,792 \cdot S1 + 0,614 \cdot S2) + (0,852 \cdot Q1 - 0,566 \cdot Q2 - 0,328 \cdot Q3 + 0,159 \cdot Q4 + 0,126 \cdot Q5) + (2,093 \cdot H1 - 1,258 \cdot H2 + 2,369 \cdot H3 - 2,711 \cdot H4) + 0,731 \cdot XI - 2,076 \cdot t_{III} - 6,412 \cdot t_{IV} + 321,234 \quad (4.11)$$

Показатели точности:

коэффициент корреляции $R=0,923$

критерий качества прогноза $S/\sigma=0,45$

допустимая ошибка $b = 50$ см

оправдываемость на обучающей выборке $p=90\%$

Уравнение 2 для уточнения прогноза максимального уровня воды в марте-апреле:

$$H_{\text{махЗырянское}} = (1,917 \cdot S1 + 0,679 \cdot S2) + (0,744 \cdot Q1 - 0,469 \cdot Q2 - 0,289 \cdot Q3 + 0,146 \cdot Q4 + 0,112 \cdot Q5) + (1,568 \cdot H1 - 1,005 \cdot H2 + 1,898 \cdot H3 - 2,213 \cdot H4) + 0,844 \cdot XI + 0,639 \cdot X_{IV} - 2,146 \cdot t_{III} - 7,025 \cdot t_{IV} + 251,455 \quad (4.12)$$

Показатели точности:

коэффициент корреляции $R=0,963$

критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,421$

допустимая ошибка $b = 50$ см

оправдываемость на обучающей выборке $p = 94 \%$

В таблице 4.18 представлено описание переменных, входящих в полученные уравнения, в таблице 4.19 показаны ошибки расчета по полученным уравнениям.

Таблица 4.18 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	t- статистика основного уравнения	t- статистика основного уравнения 1	t- статистика основного уравнения 2
S1	Снегозапасы максимальные с. Первомайское	4,293	6,907	7,751
S2	Снегозапасы максимальные с. Максимкин Яр	5,888	3,513	4,104
Q1	Среднемесячный расход воды в сентябре р. Чулым – с. Тегульдет	3,815	4,158	3,692
Q2	Среднемесячный расход воды в октябре р. Чулым – с. Тегульдет	4,370	-2,998	-2,568
Q3	Среднемесячный расход воды в сентябре р. Чулым – пгт Батурино	-3,453	-3,487	-3,135
Q4	Среднемесячный расход воды в октябре р. Чулым – пгт Батурино	-3,712	3,196	3,054
Q5	Среднемесячный расход воды в октябре р. Чулым – с. Зырянское	2,783	1,079	1,022
H1	Уровень воды на 20 марта р. Чулым – с. Зырянское	1,625	2,586	2,005
H2	Уровень воды на 31 марта р. Чулым – с. Зырянское	3,531	-1,829	-1,542
H3	Уровень воды на 10 марта р. Чулым – пгт Батурино	-3,303	2,282	1,870
H4	Уровень воды на 20 марта р. Чулым – пгт Батурино	2,998	-2,514	-2,093
XI	Осадки за январь (с. Тайга+ с. Первомайское)/2	-3,371	1,431	1,751
XIV	Осадки за апрель с. Тайга			1,964
t III	Среднемесячная температура марта с. Первомайское		-0,960	-1,056
t IV	Среднемесячная температура апреля с. Первомайское		-3,211	-3,648

Результаты рассчитанных и фактических максимальных уровней воды весеннего половодья помещены в таблице 4.19.

Результаты авторских испытаний за период 2012-2013 гг. в ФГБУ «Западно - Сибирское УГМС» приведены в таблице 4.20.

Таблица 4.19 - Рассчитанные и фактические значения максимальных уровней воды весеннего половодья р. Чулым – с. Зырянское (допустимая ошибка прогноза 50 см)

Год	Н мах факт, см	Н мах, см рассчи- танный по основно- му уравне- нию	Ошибка прогноза	Н мах, см рассчитан- ный по уточняю- щему уравнению 1	Ошибка прогноза	Н мах, см рассчитан- ный по уточняю- щему уравнению 2	Ошибка прогноза
1	2	3	4	5	6	7	8
1960	606	580	26	600	6	607	-1
1961	529	504	25	505	24	505	24
1962	543	544	-1	540	3	530	13
1963	502	510	-8	516	-14	507	-5
1964	605	552	53	592	13	590	15
1965	568	540	28	538	30	525	43
1966	688	671	17	696	-8	705	-17
1967	472	525	-53	498	-26	497	-25
1968	307	287	20	313	-6	316	-9
1969	632	582	50	604	28	606	26
1970	484	466	18	465	19	472	12
1971	553	570	-17	551	2	545	8
1972	506	510	-4	480	26	469	37
1973	614	623	-9	614	0	610	4
1974	457	447	10	445	12	446	11
1975	617	542	75	541	76	553	64
1976	473	482	-9	477	-4	455	18
1977	514	513	1	512	2	502	12
1978	498	559	-61	535	-37	541	-43
1979	607	607	0	629	-22	647	-40
1980	501	501	0	523	-22	497	4
1981	412	464	-52	447	-35	445	-33
1982	422	472	-50	454	-32	457	-35
1983	581	619	-38	628	-47	627	-46
1984	595	526	69	560	35	561	34
1985	577	525	52	523	54	544	33
1986	562	558	4	554	8	554	8
1987	550	532	18	545	5	544	6
1988	633	642	-9	635	-2	643	-10
1989	515	473	42	479	36	501	14
1990	347	407	-60	401	-54	385	-38
1991	553	558	-5	557	-4	559	-6
1992	569	552	17	557	12	563	6
1993	479	530	-51	537	-58	528	-49
1994	580	596	-16	594	-14	597	-17
1995	506	515	-9	501	5	490	16
1996	385	446	-61	463	-78	450	-65
1997	547	545	2	525	22	524	23
1998	613	610	3	612	1	616	-3
1999	583	584	-1	587	-4	585	-2
2000	488	493	-5	480	8	483	5
2001	593	572	21	558	35	550	43
2002	612	610	2	620	-8	610	2

Продолжение таблицы 4.19

1	2	3	4	5	6	7	8
2003	517	530	-13	527	-10	524	-7
2004	577	606	-29	610	-33	618	-41
2005	437	477	-40	471	-34	463	-26
2006	552	518	34	548	4	551	1
2007	635	693	-58	669	-34	653	-18
2008	559	518	41	531	28	525	34
2009	577	570	7	559	18	551	26
2010	631	616	15	627	4	624	7
2011	481	453	28	428	53	414	67

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

Таблица 4.20 - Результаты прогноза максимального уровня р. Чулым – с. Зырянское (допустимая ошибка 50 см)

Год	Факт	Прогноз по формуле 1	Ошибка	Прогноз по формуле 2	Ошибка	Прогноз по формуле 3	Ошибка
2012	467	431	36	406	61	393	74
2013	575	596	-21	607	-32	594	-19

4.2.8 р. Чулым - пгт Батурино

Уравнение для выпуска прогноза максимального уровня воды в марте:

$$N_{\text{махБатурино}} = (1,597 \cdot S_1 + 0,654 \cdot S_2) + (0,364 \cdot Q_3 - 0,254 \cdot Q_1 - 0,129 \cdot Q_2 - 1,195 \cdot Q_4 + 1,396 \cdot Q_5) + (0,623 \cdot N_1 - 1,144 \cdot N_2) + 1,219 \cdot X \text{ I} - 5,719 \cdot t \text{ III} - 12,596 \cdot t \text{ IV} + 592,173 \quad (4.13)$$

Показатели точности:

коэффициент корреляции $R=0,900$

критерий качества прогноза $S/\sigma=0,50$

допустимая ошибка $b = 59 \text{ см}$

оправдываемость на обучающей выборке $p=92\%$

В таблице 4.21 представлено описание переменных, входящих в полученные уравнения, в таблице 4.22 показаны ошибки расчета по полученным уравнениям.

Результаты рассчитанных и фактических максимальных уровней воды весеннего половодья помещены в таблице 4.22.

Результаты авторских испытаний за период 2012-2013 гг. в ФГБУ «Западно - Сибирское УГМС» приведены в таблице 4.23.

Таблица 4.21 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
S1	Снегозапасы максимальные с. Первомайское	5,479
S2	Снегозапасы максимальные с. Усть-Озерное	3,637
Q1	Среднемесячный расход воды в сентябре р. Чулым – пгт Батурино	-2,521
Q2	Среднемесячный расход воды в октябре р. Чулым – пгт Батурино	2,422
Q3	Среднемесячный расход воды в сентябре р. Чулым – с. Зырянское	3,092
Q4	Среднемесячный расход воды в феврале р. Чулым – с. Зырянское	-2,352
Q5	Среднемесячный расход воды в марте р. Чулым – с. Зырянское	2,740
H1	Уровень воды на 10 марта р. Чулым – пгт Батурино	0,541
H2	Уровень воды на 20 марта р. Чулым – пгт Батурино	-0,963
XI	Осадки за январь с. Тайга	2,655
t III	Среднемесячная температура марта с. Первомайское	-2,771
t IV	Среднемесячная температура апреля с. Первомайское	-5,258

Таблица 4.22 - Рассчитанные и фактические значения максимальных уровней воды весеннего половодья р. Чулым – пгт Батурино (допустимая ошибка прогноза 59 см)

Год	Н мах факт, см	Н мах, см рассчитанный	Ошибка прогноза
1	2	3	4
1960	957	939	18
1961	826	851	-25
1962	851	872	-21
1963	808	823	-15
1964	925	958	-33
1965	875	843	32
1966	1071	1030	41
1967	749	783	-34
1968	783	729	54
1969	1013	948	65
1970	805	809	-4
1971	882	898	-16
1972	832	768	64
1973	982	930	52
1974	794	766	28
1975	941	858	83
1976	769	775	-6
1977	819	806	13
1978	804	850	-46

Продолжение таблицы 4.22

1	2	3	4
1979	972	953	19
1980	765	761	4
1981	695	734	-39
1982	721	736	-15
1983	856	933	-77
1984	928	888	40
1985	920	914	6
1986	869	846	23
1987	819	866	-47
1988	981	962	19
1989	790	802	-12
1990	691	727	-36
1991	827	840	-13
1992	878	869	9
1993	827	875	-48
1994	907	927	-20
1995	794	789	5
1996	765	786	-21
1997	894	948	-54
1998	958	968	-10
1999	833	885	-52
2000	770	806	-36
2001	870	822	48
2002	968	924	44
2003	817	829	-12
2004	840	892	-52
2005	738	740	-2
2006	767	809	-42
2007	950	934	16
2008	830	841	-11
2009	892	837	55
2010	986	993	-7
2011	792	731	61

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

Таблица 4.23 - Результаты прогноза максимального уровня р. Чулым – пгт Батурино (допустимая ошибка 59 см)

Год	Факт	Прогноз по уравнению	Ошибка
2012	615	700	-85
2013	927	987	-50

4.2.9 р. Кан – г. Канск

Исток реки располагается на северных склонах хребта Канское Белогорье в Восточном Саяне. На этом участке стекая с гор, Кан и его притоки пересекают 4 зоны высотной поясности: арктическую пустыню, тундру (Канские Белки), лесотундру и тайгу. В истоках рек, на водоразделах, протягиваются хребты (Белогорья), вершины которых, поднимающиеся на 1800 м и более, с альпийскими лугами и горными тундрами (Идарское, Пезинское, Койское, Канское Белогорья и др.).

В среднем течении предгорные возвышенности и горы, хорошо увлажненные и покрытые лесом, окружают долину Кана и его притоков, которая в нижнем течении вступает в пределы Канско-Рыбинской степной и лесостепной котловины. Наиболее пониженная часть котловины является засушливой и теплой, здесь преобладает степная растительность.

Уравнение для выпуска прогноза:

$$\begin{aligned} H_{\max \text{ Канск}} = & (3,574 * S_{\max \text{ Петр.}} - 3,001 * S_{10. \text{III Петр.}} + 0,500 * S_{\max \text{ Сол.}}) + \\ & + (1,770 * D_{\max \text{ Канск}} + 1,323 * D_{\max \text{ Ирб.}}) + (1,291 * D_{\min} - 1,522 * D_{\text{ср.сутСол.}}) + \\ & + (1,177 * H_{\min \text{III Канск}} - 0,444 * H_{\min \text{III-150 Ирб.}}) + 1,574 * X_{\text{IV Сол.}} + 74,8 \end{aligned} \quad (4.14)$$

показатели точности $R = 0,859$

критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,579$

допустимая ошибка $\sigma = 52 \text{ см}$

оправдываемость на обучающей выборке $p = 83\%$

Таблица 4.24 - Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
1	2	3
$S_{\max \text{ Петр.}}$	Максимальный за зиму запас воды в снеге (Петропавловка)	3.7
$S_{10. \text{III Петр.}}$	Запас воды в снеге (Петропавловка, 10 марта)	-3.0
$S_{\max \text{ Сол.}}$	Максимальный за зиму запас воды в снеге (Солянка)	1.4
$D_{\max \text{ Канск}}$	Дата перехода максимальной суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, (Канск)	1.8
$D_{\max \text{ Ирб.}}$	Дата перехода максимальной суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, (Ирбейское)	1.3
$D_{\min \text{ Сол.}}$	Дата перехода минимальной суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, (Солянка)	1.5

Продолжение таблицы 4.24

1	2	3
Дср.сутСол	Дата перехода средней суточной температуры воздуха через 0° в сутках от 1 марта, (Солянка)	-2.0
HminIII Канск	Минимальный в марте уровень воды, р. Кан – г. Канск	3.2
HminIII-150 Ирб.	Минимальный в марте уровень воды за вычетом 150, р. Кан – с. Ирбейское	-1.8
X IVСол.	Количество осадков в апреле, (Солянка)	2.8

Результаты рассчитанных и фактических максимальных уровней воды весеннего половодья помещены в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Рассчитанные и фактические значения максимальных уровней воды весеннего половодья р. Кан – г. Канск (допустимая ошибка прогноза 52 см)

Год	H мах факт, см	H мах, см Прогноз	Ошибка прогноза
1	2	3	4
1967	368	316	52
1968	311	252	59
1969	377	387	-10
1970	480	445	35
1971	256	255	1
1972	473	315	158
1973	423	387	36
1974	336	360	-24
1975	337	317	20
1976	301	278	23
1977	375	337	38
1978	337	371	-34
1979	343	359	-16
1980	409	382	27
1981	233	261	-28
1982	438	398	40
1983	325	333	-8
1984	303	373	-70
1985	293	355	-62
1986	313	313	0
1987	501	407	94
1988	406	407	-1
1989	272	297	-25
1990	185	186	-1
1991	286	348	-62
1992	335	298	37

Продолжение таблицы 4.25

1	2	3	4
1993	209	215	-6
1994	306	272	34
1995	387	427	-40
1996	263	300	-37
1997	312	245	67
1998	417	363	54
1999	339	387	-48
2000	295	299	-4
2001	494	461	33
2002	209	230	-21
2003	240	246	-6
2004	362	349	13
2005	462	431	31
2006	334	351	-17
2007	235	286	-51
2008	288	261	27
2009	338	342	-4
2010	385	424	-39
2011	263	315	-52
2012	296	346	-50

За 2013 год в период авторских испытаний в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» ошибка прогноза не вышла за пределы допустимой (таблица 4.26).

Таблица 4.26 –Результаты прогноза максимального уровня р. Кан – г. Канск (допустимая ошибка 52 см)

Год	$H_{\max}$ Канск (наблюденный)	П рогноз	О шибка
2013	343	3 54	- 11

4.2.10 р. Кеть – пос. Максимкин Яр

р. Кеть – один из крупных притоков Оби, впадает справа на 2246 км от устья, площадь водосбора 94 200 км. Бассейн реки расположен в лесной таежной зоне, в пределах самой обширной болотной зоне выпуклых грядово-мочажинный болот. р. Кеть – пос. Максимкин Яр – район среднего течения реки, площадь водосбора 38400 км².

Сроки наступления $H_{M-Яр \max}$ достаточно растянуты (начало мая – середина июня). Крайние сроки наступления $H_{M-Яр \max}$ – 6 мая (2010 г), 20 июня (2000 г).

Формирование максимального уровня воды весеннего половодья происходит в результате сложной взаимосвязи процессов, происходящих в бассейне, русле реки в течение осени, зимы и весеннего периода (таблица 4.21).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ВОДЫ

р. Кеть – пос. Максимкин Яр, в конце марта:

$$H_{\text{М-Яр max}} = (S_{1 \text{ М-Яр}} + 0,895 \cdot X) + 1.442 \cdot H_1 - 2.609 \cdot H_2 + 0.622 \cdot Q_{\text{ХП}} + 766.918 \quad (4.15)$$

показатели точности: $R = 0.922$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.407$;

УТОЧНЕННЫЙ ПРОГНОЗ МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ВОДЫ

р. Кеть – пос. Максимкин Яр, с учетом температуры воздуха и осадков в апреле:

$$H_{\text{М-Яр max}} = (S_{2 \text{ М-Яр}} + 0,895 \cdot X) + 1.157 \cdot H_1 - 2.271 \cdot H_2 + 0.635 \cdot Q_{\text{ХП}} + 1.107 \cdot X_{\text{IV}} - 4.361 \cdot t_{\text{IV}} + 687.694 \quad (4.16)$$

Показатели точности: $R = 0.942$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.360$, $n = 52$ года. Описание переменных представлено в таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (4.15), (4.16)

Обозначение	Смысловое значение	t – статистики	
1	2	3	4
$S_{1 \text{ М-Яр}}$, $S_{2 \text{ М-Яр}}$, X	Показатели снегонакопления, где $S_{1 \text{ М-Яр}} = 0.992 \cdot S_1 + 1.159 \cdot S_2 + 0.622 \cdot S_3$; $S_{2 \text{ М-Яр}} = 0.982 \cdot S_1 + 1.095 \cdot S_2 + 0.681 \cdot S_3$; X – сумма осадков за январь, февраль, март, Петропавловка; S_1 – максимальный запас воды в снеге, Петропавловка; S_2 – запас воды в снеге 31 марта, Колпашево; S_3 – запас воды в снеге 31 марта, Усть-Озерная	4,035	4,294
H_1	H_1 – минимальный зимний уровень, р.Кеть – М. Яр; Показатель пропускной способности русла; увлажнения, промерзания бассейна перед половодьем	4,512	5,341
H_2	H_2 – уровень воды на 10 апреля, р.Кеть – Родионовка, расположена 375 км ниже М. Яра, показатель начала весны	4,244	3,883

Продолжение таблицы 4.27			
1	2	3	4
Q_{XII}	Q_{XII} - среднемесячный расход воды за декабрь, показатель объема льда в период наиболее интенсивного его нарастания	4,546	5,271
t_{IV}	t_1 - среднемесячная температура воздуха за апрель, Петропавловка	4,084	3,669
X_{IV}	X_{IV} – сумма осадков за апрель, Петропавловка		-6,980

Таблица 4.28 – Результаты прогноза максимального уровня р. Кеть – пос. Максимкин Яр (допустимая ошибка 62 см)

Год	$H_{M-Яр\ max}$ (измеренный)	Уравнение 1		Уравнение 2	
		прогноз	ошибка	прогноз	ошибка
2008	611	606	5	620	-9
2009	678	670	8	658	20
2010	599	641	-42	635	-36
2011	565	580	-15	578	-13
2012	493	453	40	463	30

4.2.11 р. Лена – г. Усть-Кут

Бассейн Верхней Лены расположен в пределах Среднесибирского плоскогорья и горных хребтов Прибайкалья (рисунок 4.4). Река Лена берет начало с Байкальского хребта, принимает свой первый крупный приток – р. Иликту, стекающую с северной оконечности Онотской возвышенности. Ниже устья р. Иликты Лена вступает в Прибайкальскую впадину, в пределах которой принимает притоки слева р. Манзурку, справа р. Ангу. Далее она пересекает Лено-Ангарское плато, с которого стекают притоки справа Тутура и Орлинга, слева Илга и Кута. Ниже Лена течет по Приленскому плато, где справа принимает р. Киренгу, берущую начало с Прибайкальского хребта.

Западной границей бассейна Верхней Лены является Березовый и Илимский хребты с колебаниями высот 500 - 1000 м над уровнем моря, отделяющие Лену от бассейна р. Ангары. На юге водоразделом с р. Ангарой служит Онотский хребет, имеющий плавные очертания с высотами 1000 - 1100 м. С востока территория ограничивается Приморским и Байкальским хребтами с высотами 1200-1800 м, с высотой отдельных гольцов до 2500 м над уровнем моря.

Поверхность бассейна рассечена многочисленными речными долинами и падями (горные долины без стока или с временным стоком). Долины в своих верховьях широкие,

часто с заболоченным дном и крутыми склонами, по мере приближения к устью они глубоко врезаются между водоразделами (200 - 300 м) и приобретают V – образную форму.

Климат Верхней Лены отличается резкой континентальностью. В зимнее время сказывается влияние мощного Сибирского антициклона. Летом устанавливается относительно низкое атмосферное давление. Континентальность климата характеризуется большими колебаниями годовых и суточных температур воздуха, зимой с низкими температурами (-45°C) с преобладанием ясной и тихой погоды, относительно теплым, но коротким летом. Среднесуточные температуры воздуха изменяются от $-28,4^{\circ}$ в январе и до $17,6^{\circ}$ в июле. В связи с интенсивным прогреванием воздуха весной разница между средними месячными температурами воздуха февраля, марта и апреля равна $10 - 12^{\circ}$, а частые вторжения арктических масс обуславливают большую изменчивость средних суточных температур воздуха в мае от -15 до $+25^{\circ}$.

Количество осадков за год, отмечаемое пунктами наблюдений в бассейне Лены колеблется от 350 до 530 мм. Минимум осадков бывает в марте (около 3 % годовой суммы), максимум приходится на июль (16 %). За холодный период в горах выпадает 20 – 30 % годовой суммы осадков. Большая роль в формировании снежного покрова принадлежит осадкам октября и апреля, около 35 % суммы осадков за холодный период.



Б)

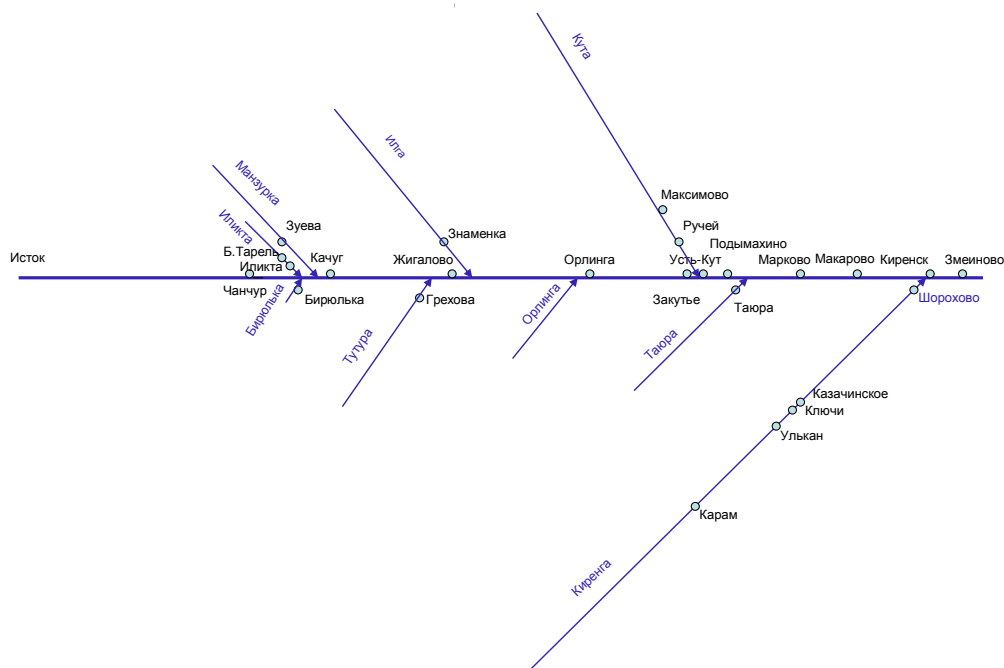


Рисунок 4.4 - А) Схема бассейна Верхней Лены. Б) Схема речной сети с пунктами наблюдений.

Весенние заторы льда чаще возникают на реках, текущих с юга на север, которые вскрывающихся под влиянием формирующейся в верхней части бассейна волны половодья. В этом отношении типичны рассматриваемые ниже реки **Лена и Бирюса**.

В период вскрытия кромка льда смещается вниз по течению. Этот процесс сопровождается остановками и подвижками льда, приводящими к его дроблению, уплотнению и образованию затора (рисунок 4.5).

На реках Лене и Бирюсе процесс вскрытия представляет собой цепь последовательного образования и разрушения заторов льда.

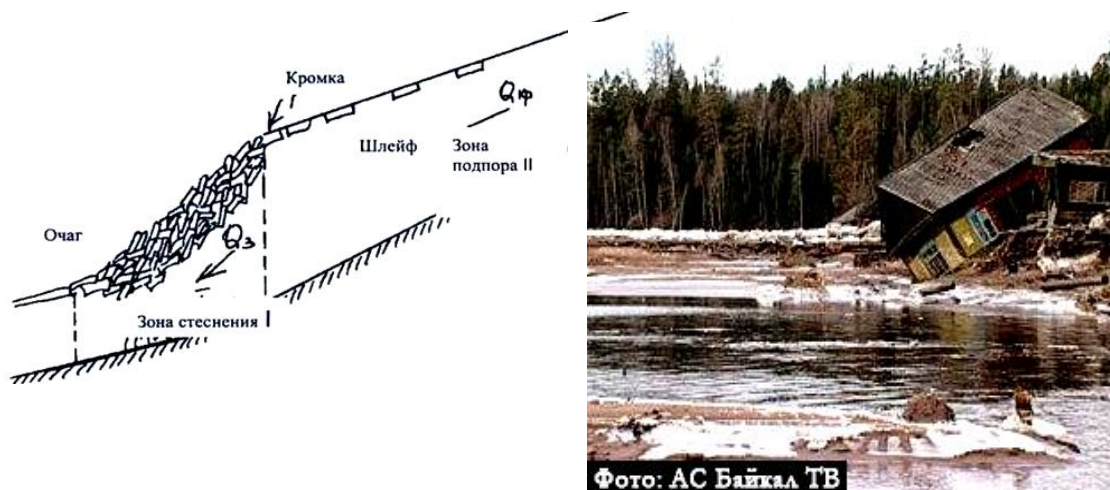


Рисунок 4.5 - А) Схема затора льда (по В.А. Бузину). Б) После затора

Формулы для прогноза максимальных уровней воды р. Лены – г. Усть-Кут имеют следующий вид:

– прогноз в конце марта

$$H_{\max} \text{ У-Кут} = 1,397 * S_{\max} \text{ Чанчур.} + (0,421 * H_1 - 0,486 * H_5) - (0,563 * H_2 \text{ макс.зим} - 0,697 * H_3 \text{ 10.03}) + 0,341 * H_4 - (1,056 * H_7 - 1,250 * H_6) + 1,068 * D_1 + 1,749 * D_2 + 9,100 * X_1 - 8,784 * t_1 - 7,528 * t_2 - 7,337 * t_3 - 295,863 \quad (4.17)$$

$$R = 0,878; \quad S/\sigma = 0,590$$

– прогноз в конце апреля

$$H_{\max} \text{ У-Кут} = 1,695 * S_{\max} \text{ Чанчур.} + (0,515 * H_1 - 0,562 * H_5) - 0,714 * (H_2 \text{ макс.зим} - H_3 \text{ 10.03}) + 0,317 * H_4 - (1,706 * H_7 - 1,910 * H_6) + 1,529 * D_1 + 2,674 * D_2 + 8,914 * X_1 - 12,832 * t_1 - 7,243 * t_2 - 5,262 * t_3 - 9,570 * t_4 - 328,883 \quad (4.18)$$

$$R = 0,928; \quad S/\sigma = 0,480$$

В таблицах 4.29 – 4.30 представлено описание переменных, входящих в полученные уравнения, в таблице 4.31 показаны ошибки расчета по полученным уравнениям.

Таблица 4.29 – Описание переменных в уравнении (4.17)

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
1	2	3
S макс, Чанчур	Максимальный запас воды в снеге, Чанчур	3,812
X1,март Бирюлька	Осадки первой декады марта, Бирюлька	4,504
H2максим Орлинга	Максимальный зимний уровень воды, Орлинга	-1,872
H3 10.03 Орлинга	Уровень воды 10.03, Орлинга	2,630
H1 лдст Орлинга	Уровень воды на дату ледостава, Орлинга	1,827
H4 лдст Качуг	Уровень воды на дату ледостава, Качуг	1,168
D1Дата лдст Качуг	Дата установления ледостава, Качуг (число сут. с 1.10)	1,258
H5 лдст У-кут	Уровень воды на дату ледостава, Усть-Кут	-2,891
D2Дата лдст У-кут	Дата установления ледостава, Усть-Кут	1,371
H6 10.03.У-Кут	Уровень воды 10.03, Усть-Кут	0,862
H7 20.03.У-Кут	Уровень воды 20.03, Усть-Кут	-0,747

Продолжение таблицы 4.29

1	2	3
t1 октябрь, Качуг	Температура октября, Качуг	-1,519
t2 февраль, Качуг	Температура февраля, Качуг	-3,263
t3 III Жигалово	Температура марта, Жигалово	-3,384

Таблица 4.30 – Описание переменных в уравнении (4. 18)

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
S мах, Чанчур	Максимальный запас воды в снеге, Чанчур	5,647
X1, март Бирюлька	Осадки первой декады марта, Бирюлька	5,563
H2 мах зим Орлинга	Максимальный зимний уровень воды, Орлинга	-2,958
H3 10.03 Орлинга	Уровень воды 10.03, Орлинга	3,399
H1 лдст Орлинга	Уровень воды на дату ледостава, Орлинга	2,799
H4 лдст Качуг	Уровень воды на дату ледостава, Качуг	1,369
D1Дата лдст Качуг	Дата установления ледостава, Качуг (число сут. с 1.10)	2,241
H5 лдст У-кут	Уровень воды на дату ледостава, Усть-Кут	-4,175
D2Дата лдст У-кут	Дата установления ледостава, Усть-Кут	2,578
H6 10.03.У-Кут	Уровень воды 10.03, Усть-Кут	1,645
H7 20.03.У-Кут	Уровень воды 20.03, Усть-Кут	-1,507
t1 октябрь, Качуг	Температура октября, Качуг	-2,734
t2 февраль, Качуг	Температура февраля, Качуг	-3,957
t3 III Жигалово	Температура марта, Жигалово	-2,933
t4 IV Жигалово	Температура апреля, Жигалово	-4,045

Таблица 4.31 – Результаты расчета максимального уровня воды

р. Лена - Усть-Кут (допустимая ошибка -101 см)					
Год	Факт	Прогноз по формуле 4.13	Ошибка	Прогноз по формуле 4.14	Ошибка
2008	305	268	37	276	29
2009	425	504	-79	430	-5
2010	712	677	35	723	-11
2011	435	473	-38	460	-25
2012	642	587	55	609	33
2013	660	763	-103	782	-122

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

4.2.12 р. Лены – с. Змеиново

Формулы для прогноза максимальных уровней имеют вид:

$$H_{\max \text{Змеиново}} = 1,996 * S_{\max \text{Чанчур}} + 1,153 * H1_{\text{нач.осеннего лдх Киренск}} - 1,381 * H2_{\text{лдст Киренск}} + 1,544 * H3_{\text{мин.зим Киренск}} - (9,958 * H5 - 9,134 * H4) - (6,952 * H7 - 7,728 * H6) - 2,268 * Q_{\text{III Закутье}} + (7,905 * X2 + 2,581 * X3 + 9,737 * X4) + 12,120 * D1 - 28,015 * t1_{\text{октябрь}} + 245,226 \quad (4.19)$$

$$R = 0,899$$

$$S/\sigma = 0,548$$

$$H_{\max \text{Змеиново}} = 2,244 * S_{\max \text{Чанчур}} + 1,188 * H1_{\text{нач.осеннего лдх Киренск}} - 1,186 * H2_{\text{лдст Киренск}} + 1,032 * H3_{\text{мин.зим Киренск}} - (9,258 * H5 - 8,775 * H4) - (4,336 * H7 - 4,852 * H6) - 2,236 * Q_{\text{III Закутье}} + (6,955 * X2 + 2,125 * X3 + 8,454 * X4) + 13,054 * D1 - 31,946 * t1_{\text{октябрь}} + 124,140 \quad (4.20)$$

$$R = 0,921$$

$$S/\sigma = 0,499$$

В таблицах 4.32 – 4.33 представлено описание переменных, входящих в полученные уравнения, в таблице 4.34 показаны ошибки расчета по полученным уравнениям.

Таблица 4.32 – Описание переменных в уравнении (4.19)

Обозначение переменных	Смысловое значение	t-статистика
1	2	3
S max, Чанчур	Максимальный запас воды в снеге, Чанчур	2,836
H1 нач. осен. лдх Киренск	Уровень начала осеннего ледохода,	2,139
H2 лдст Киренск	Уровень ледоставаа, Киренск	-2,572
H3 мин. Зим Киренск	Уровень мин. зимний, Киренск	2,825
H4 20.03 Закутье	Уровень 20.03, Закутье	3,279
H5 31.03 Закутье	Уровень 31,03, Закутье	-3,717
H6 31.03 Киренск	Уровень 31,03, Киренск	3,185
H7 10.04 Киренск	Уровень 10.04, Киренск	-2,840
X2, февраль Чанчур	Осадки, февраль, Чанчур	2,938
X3, март Чанчур	Осадки, март, Чанчур	0,905

Продолжение таблицы 4.32

1	2	3
X4, март Бириюлька	Осадки, март, Бириюлька	2,221
t1 октябрь, Качуг	t1 октябрь, Качуг	-3,201
D1-Дата лдст Закутье, от 1.10	Дата лдст Закутье, от 1.10	4,419
QIII Закутье	Средний расход воды, март	-3,304

Таблица 4.33 – Описание переменных в уравнении (4.20)

Обозначение	Смысловое значение	t-статистика
S max, Чанчур	Максимальный запас воды в снеге, Чанчур	2,836
H1 нач. осен. лдх Киренск	Уровень начала осеннего ледохода, Киренск	2,139
H2 лдст Киренск	Уровень ледоставаа, Киренск	-2,572
H3 мин. Зим Киренск	Уровень мин. зимний, Киренск	2,825
H4 20.03 Закутье	Уровень 20.03, Закутье	3,279
H5 31.03 Закутье	Уровень 31,03, Закутье	-3,717
H6 31.03 Киренск	Уровень 31,03, Киренск	3,185
H710.04 Киренск	Уровень 10.04, Киренск	-2,840
X2, февраль Чанчур	Осадки, февраль, Чанчур	2,938
X3, март Чанчур	Осадки, март, Чанчур	0,905
X4, март Бириюлька	Осадки, март, Бириюлька	2,221
t1 октябрь, Качуг	Температура, октябрь, Качуг	-3,201
D1-Дата лдст Закутье, от 1.10	Дата лдст, Закутье, от 1.10	4,419
QIII Закутье	Средний расход воды, март	-3,304
t2 апрель, Качуг	Температура, апрель, Качуг	2,836

Таблица 4.34– Результаты расчета максимального уровня воды

р. Лена – с. Змеиново (допустимая ошибка -71 см)					
Год	Факт	Прогноз по формуле 4.15	Ошибка	Прогноз по формуле 4.16	Ошибка
2008	661	672	-11	670	-9
2009	584	573	11	555	29
2010	727	702	25	745	-18
2011	569	591	-22	578	-9
2012	666	599	67	588	78
2013	736	782	-46	786	-50

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

4.2.13 р. Лена– пгт Жигалово

Формулы для прогноза максимальных уровней воды имеют вид:

$$H_{\text{мах Жигалово}} = 1,397 \cdot S_{\text{мах Чанчур}} + (0,421 \cdot H_1 - 0,486 \cdot H_5) - (0,563 \cdot H_2_{\text{мах.зим}} - 0,697 \cdot H_3_{10.03}) + 0,341 \cdot H_4 - (1,056 \cdot H_7 - 1,250 \cdot H_6) + 1,068 \cdot D_1 + 1,749 \cdot D_2 + 9,100 \cdot X_1 - 8,784 \cdot t_1 - 7,528 \cdot t_2 - 7,337 \cdot t_3 - 295,863 \quad (4.21)$$

$$R = 0,878$$

$$S/\sigma = 0,590$$

$$H_{\text{мах Жигалово}} = 1,695 \cdot S_{\text{мах Чанчур}} + (0,515 \cdot H_1 - 0,562 \cdot H_5) - 0,714 \cdot (H_2_{\text{мах.зим}} - H_3_{10.03}) + 0,317 \cdot H_4 - (1,706 \cdot H_7 - 1,910 \cdot H_6) + 1,529 \cdot D_1 + 2,674 \cdot D_2 + 8,914 \cdot X_1 - 12,832 \cdot t_1 - 7,243 \cdot t_2 - 5,262 \cdot t_3 - 9,570 \cdot t_4 - 328,883 \quad (4.22)$$

$$R = 0,928$$

$$S/\sigma = 0,480$$

Допустимая ошибка = 41 см

В таблице 4.35 дано описание переменных, в таблице 4.36 – результаты расчетов.

Таблица 4.35 – Описание переменных в уравнении (4.21 – 4.22)

Обозначение переменных	Смысловое значение	t-статистики	
		ф-ла 4,21	ф-ла 4,22
1	2	3	4
S мах, Чанчур	Максимальный запас воды в снеге, Чанчур	3,812	5,647
X1, март Бирюлька	Осадки первой декады марта, Бирюлька	4,504	5,563
H2 мах зим Орлинга	Максимальный зимний уровень воды, Орлинга	-1,872	-2,958
H3 10.03 Орлинга	Уровень воды 10.03, Орлинга	2,630	3,399
H1 лдст Орлинга	Уровень воды на дату ледостава, Орлинга	1,827	2,799
H4 лдст Качуг	Уровень воды на дату ледостава, Качуг	1,168	1,369
D1Дата лдст Качуг	Дата установления ледостава, Качуг (число сут. с 1.10)	1,258	2,241
H5 лдст У-кут	Уровень воды на дату ледостава, Усть-Кут	-2,891	-4,175
D2Дата лдст У-кут	Дата установления ледостава, Усть-Кут	1,371	2,578
H6 10.03.У-Кут	Уровень воды 10.03, Усть-Кут	0,862	1,645
H7 20.03.У-Кут	Уровень воды 20.03, Усть-Кут	-0,747	-1,507
t1 октябрь,Качуг	Температура октября, Качуг	-1,519	-2,734

Продолжение таблицы 4.35

1	2	3	4
t2 февраль, Качуг	Температура февраля, Качуг	-3,263	-3,957
t3 III Жигалово	Температура марта, Жигалово	-3,384	-2,933
t4 IV Жигалово	Температура апреля, Жигалово	–	-4,045

Таблица 4.36 – Результаты расчета максимального уровня воды

р. Лена – пгт Жигалово (допустимая ошибка -71 см)					
Год	Факт	Прогноз по формуле 4.17	Ошибка	Прогноз по формуле 4.18	Ошибка
2008	305	268	37	276	29
2009	425	504	-79	430	-5
2010	712	677	35	723	-11
2011	435	473	-38	460	-25
2012	642	587	55	609	33
2008	305	268	37	276	29

4.2.14 р. Бирюса – г. Бирюсинск

Длина реки 1012 км, площадь бассейна 55 800 км². Берёт начало с Джуглымского хребта в Восточном Саяне (рисунки 4.6, 4.7). В среднем и нижнем течении протекает по Среднесибирскому плоскогорью. Основные притоки: Тагул, Туманшет, Пойма — слева; Малая Бирюса, Топорок — справа. Питание снеговое и дождевое, составляет 80 % от годового стока. Замерзает в октябре — ноябре, вскрывается в конце апреля — начале мая. Средний расход воды в районе посёлка Шиткино— 300 м³/сек.

Город Бирюсинск находится в среднем течении в 568 км от устья ($F_{вдсб} = 24700 \text{ км}^2$). В этом створе максимальные уровни воды бывают как заторного, так и не заторного происхождения. Средняя дата наступления $H_{б\max}$ – 13 мая; крайние - 12 апреля (1989), 10 июня (1980). Рельеф в истоках носит горный характер. Отдельные хребты поднимаются выше 2000 м. Междуречья среднего течения заняты сравнительно невысокими поднятиями (хребты Яги, Бадан, Бирюсинский, Гутарский).

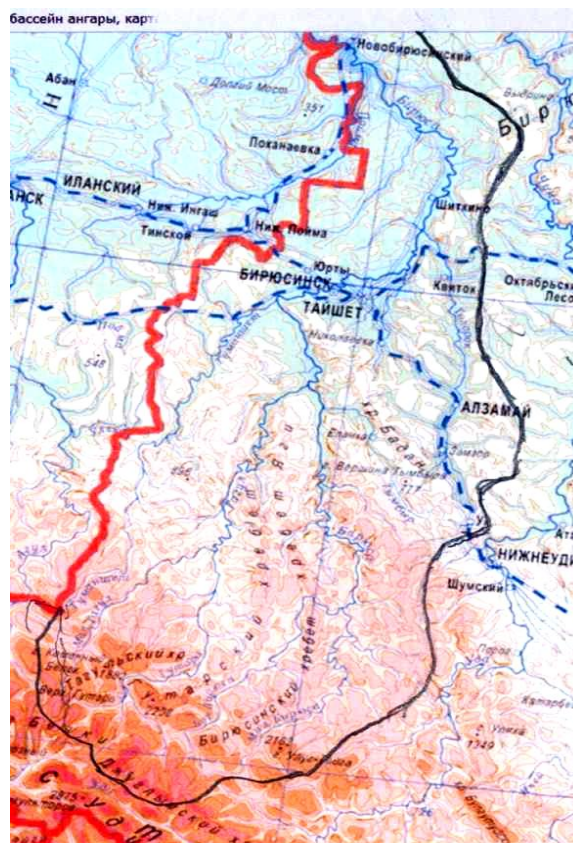


Рисунок 4.6 - Бассейн р. Бирюса

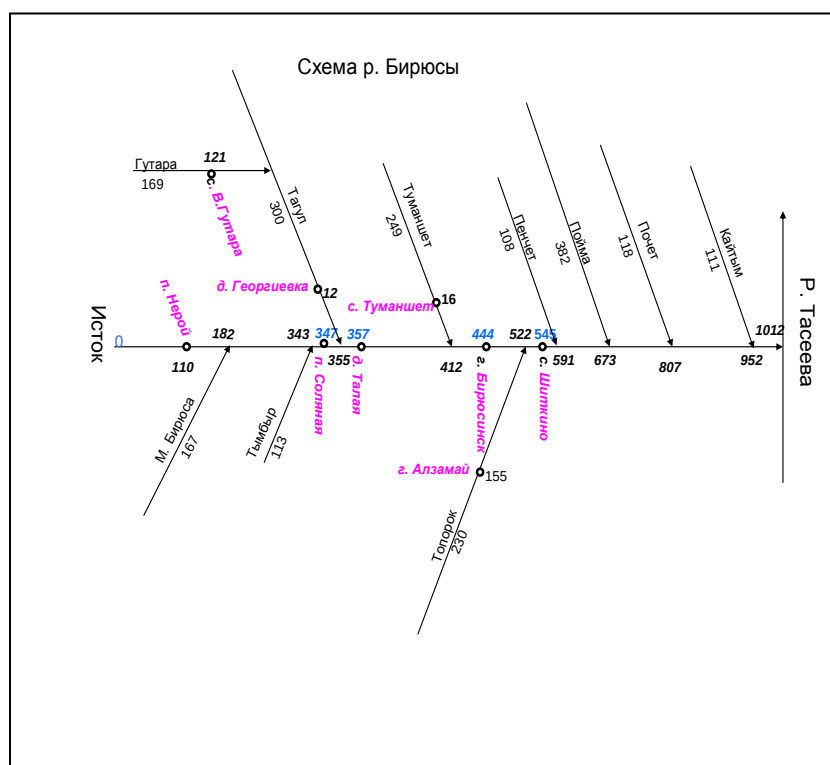


Рисунок 4.7 - Схема речной сети в бассейне р. Бирюса и расположение пунктов наблюдений.

1. Уравнение для выпуска прогноза в конце первой декады апреля:

$$H_{\text{Бmax}} = S_{\text{Б}} - 3,428 \cdot Q_1 + (0,499 \cdot H_2 - 2,336 \cdot H_1) + (1,139 \cdot H_3 - 1,149 \cdot H_4) - (9,895 \cdot H_7 - 17,189 \cdot H_6 + 8,580 \cdot H_5) - 1,561 \cdot \Delta H_1 + 2,410 \cdot X_1 + (-7,703 \cdot t_1 - 3,938 \cdot t_2 - 12,696 \cdot t_3) + 603,368 \quad (4.23)$$

показатели точности: $R = 0,914$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,501$, $n = 44$ года.

Описание переменных уравнения 4.23 даны в таблице 4.37.

Таблица 4.37 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении (4.23).

Обозначение	Смысловое значение	t - статистика формула (4.23)
$S_{\text{Б}}$	$S_{\text{Б}} = (S_1 + S_2)$ – показатель снегонакопления, где: S_1 – максимальный запас воды в снеге, Верхняя Гутара; S_2 – запас воды в снеге на 31 марта, Тайшет	1,6; 2,1
Q_1	Среднемесячный расход воды за январь, р. Бирюса – пгт Шиткино	6,1
H_1	Уровень воды на момент начала ледовых образований, р. Бирюса – с. Талая	-5,4
H_2	Уровень воды начала ледостава, р. Бирюса – с. Талая	3,2
H_3	Уровень воды за день перед началом ледостава, р. Бирюса – пгт Шиткино	3,6
H_4	Уровень воды начала ледостава, р. Бирюса – пгт Шиткино	-3,2
H_5	Уровень воды 10 марта, р. Бирюса – пгт Шиткино	-2,4
H_6	Уровень воды 20 марта, р. Бирюса – пгт Шиткино	3,4
H_7	Уровень воды 31 марта, р. Бирюса – пгт Шиткино	-3,7
ΔH_1	$\Delta H_1 = (H_9 - H_{10})$, где H_9 – уровень воды 31 марта, H_{10} – уровень воды 10 апреля, р. Бирюса – с. Талая	-2,9
X_1	X_1 – сумма осадков за март, Тайшет	3,1
t_1	Среднемесячная температура воздуха, октябрь, Тайшет	-2,3
t_2	Среднемесячная температура воздуха, февраль, Тайшет	-2,4
t_3	Среднемесячная температура воздуха, март, Тайшет	-4,9

Таблица 4.38 – Результаты рассчитанного максимального уровня у г. Бирюсинск (допустимая ошибка 50 см)

Год	Нмах наблюденный	Нмах рассчитанный	Ошибка
1967	293	286	7
1968	277	249	28
1969	368	380	-12
1970	439	452	-13
1971	301	299	2
1972	414	358	56
1973	441	419	22
1974	282	288	-6
1975	337	297	40
1976	270	302	-32
1977	329	349	-20
1978	307	290	17
1979	379	342	37
1980	484	467	17
1981	268	341	-73
1982	393	372	21
1983	300	298	2
1984	316	296	20
1985	286	295	-9
1986	273	259	14
1987	441	419	22
1988	375	390	-15
1989	221	240	-19
1990	211	211	0
1991	286	355	-69
1992	316	275	41
1993	201	215	-14
1994	274	257	17
1995	293	256	37
1996	208	261	-53
1997	274	346	-72
1998	238	226	12
1999	378	376	2
2000	307	321	-14
2001	445	416	29
2002	253	235	18
2003	269	294	-25
2004	391	397	-6
2005	486	447	39
2006	352	372	-20
2007	340	353	-13
2008	330	337	-7
2009	357	352	5
2010	402	417	-15
2011	272	314	-42
2012	346	236	110
2013	372	352	20

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

4.2.15 Бирюса – пгт Шиткино

Шиткино расположено в 100 км ниже г. Бирюсинска, 467 км от устья ($F_{вдсб} = 31800 \text{ км}^2$). В этом створе максимальные уровни воды бывают как заторного, так и не заторного происхождения. Средняя дата наступления $H_{ш\max}$ – 11 мая; крайние - 12 апреля (1991), 8 июня (1973).

Уравнение для выпуска прогноза в конце первой декады апреля:

$$H_{ш\max} = S_{ш} - 3,661 \cdot Q_I + (0,458 \cdot H_2 - 2,023 \cdot H_1) + (1,534 \cdot H_3 - 1,318 \cdot H_4) - (9,572 \cdot H_7 - 17,154 \cdot H_6 + 8,905 \cdot H_5) - 1,998 \cdot \Delta H_1 + 3,445 \cdot X_1 + (-7,212 \cdot t_1 - 3,777 \cdot t_2 - 12,672 \cdot t_3) + 718,012 \quad (4.24)$$

показатели точности: $R = 0,919$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,506$, $n = 44$ года.

Описание переменных уравнения (4.24) и результаты расчетов даны в табл. 4.39-4.40.

Таблица 4.39 – Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении (4.24)

Обозначение	Смысловое значение	t – статистика, формула (4.24)
1	2	3
$S_{ш}$	$S_B = (S_1 + S_2)$ – показатель снегонакопления, где: S_1 – максимальный запас воды в снеге, Верхняя Гутара; S_2 – запас воды в снеге на 31 марта, Тайшет	1,1; 2,7
Q_I	Среднемесячный расход воды за январь, р. Бирюса – р.п. Шиткино	5,8
H_1	Уровень воды на момент начала ледовых образований, р. Бирюса – с. Талая	-4,3
H_2	Уровень воды начала ледостава, р. Бирюса – с. Талая	2,7
H_3	Уровень воды за день перед началом ледостава, р. Бирюса – р.п. Шиткино	3,8
H_4	Уровень воды начала ледостава, р. Бирюса – р.п. Шиткино	-3,0
H_5	Уровень воды 10 марта, р. Бирюса – р.п. Шиткино	-2,4
H_6	Уровень воды 20 марта, р. Бирюса – р.п. Шиткино	3,4
H_7	Уровень воды 31 марта, р. Бирюса – р.п. Шиткино	-3,7
ΔH_1	$\Delta H_1 = (H_9 - H_{10})$, где H_9 – уровень воды 31 марта и H_{10} – уровень воды 10 апреля, р. Бирюса – с. Талая	-3,1
X_1	X_1 – сумма осадков за март, Тайшет	3,9
t_1	Среднемесячная температура воздуха, октябрь, Тайшет	-2,0
t_2	Среднемесячная температура воздуха, февраль, Тайшет	-2,2

Продолжение таблицы 4.39

1	2	3
t ₃	Среднемесячная температура воздуха, март, Тайшет	-4,9
H ₈	Уровень воды на момент начала ледовых образований, р. Бирюса – г. Бирюсинск	-1,9
H ₉	Уровень воды начала ледостава, р. Бирюса – г. Бирюсинск	1,5

Таблица 4.40 –Результаты рассчитанного максимального уровня у пгт Шиткино (допустимая ошибка 57 см)

Год	H мах наблюденный	H мах рассчитанный	Ошибка
1	2	3	4
1967	503	505	-2
1968	471	439	32
1969	558	573	-15
1970	645	658	-13
1971	448	462	-14
1972	608	563	45
1973	665	664	1
1974	470	480	-10
1975	523	474	49
1976	456	482	-26
1977	514	539	-25
1978	522	512	10
1979	566	563	3
1980	707	663	44
1981	469	556	-87
1982	583	551	32
1983	515	511	4
1984	532	499	33
1985	502	501	1
1986	484	440	44
1987	630	622	8
1988	633	598	35
1989	412	438	-26
1990	363	384	-21
1991	480	556	-76
1992	520	513	7
1993	371	395	-24
1994	477	434	43
1995	496	456	40
1996	394	442	-48
1997	482	556	-74
1998	433	416	17
1999	593	601	-8
2000	531	524	7
2001	677	661	16
2002	436	418	18
2003	415	442	-27

Продолжение таблицы 4.40

1	2	3	4
2004	581	594	-13
2005	670	630	40
2006	557	564	-7
2007	609	589	20
2008	514	507	7
2009	552	548	4
2010	569	615	-46
2011	430	497	-67
2012	516	411	105
2013	568	537	31

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

4.3 О сложившейся практике борьбы с наводнениями, обусловленными заторами льда на реках России, посредством взрывных работ

(В подготовке данного материала приняли участие дгн. Д.А. Бураков (ФГБУ «СибНИГМИ» - г. Новосибирск, КрасГАУ – г. Красноярск), дтн, В.А. Бузин (ФГБУ «ГГИ» – г. Санкт-Петербург) и дгн. В.А. Земцов (ТГУ – г. Томск).

Ежегодно весной на реках России гремят взрывы: МЧС и другие ведомства проводят подрывы ледяного покрова. Например, в 2004 году в Северо-Западном, Приволжско-Уральском и Сибирском регионах осуществлено более 3200 подрывов льда (<http://www.amic.ru/news/13562/&dd=23&mm=4&yy=2004>). В последние годы в Интернете можно найти многие десятки сообщений о профилактических подрывах ледяного покрова и последующих бомбёжках заторов льда. В этой работе ежегодно участвуют тысячи человек, затрачиваются огромные средства. Но всегда ли эти мероприятия приводят к положительным результатам? Изучение этого вопроса дает отрицательный ответ. Более того, подрывы льда нередко приводят к увеличению высоты и продолжительности наводнений. Приведем примеры.

- По имеющимся оценкам специалистов-гидрологов ФГБУ «ГГИ», подрыв и бомбёжка затора льда при историческом наводнении в 2001 году на реке Лена у города Ленск не снизили, а, наоборот, увеличили высоту уровня воды Лены у Ленска на 2 метра, что сыграло негативную роль. Пострадали больше 40 тысяч человек, имеются погибшие, а общая сумма ущерба по оценке правительства Республики Саха (Якутия) составила 7,1 миллиарда рублей.
- Заторное наводнение на р. Абакан у г. Абаза весной 2004 года также сопровождалось необдуманными подрывами льда, в результате которых расположен-

ный выше по течению затор был «спущен» к году. Пострадали четыреста тридцать усадеб, где проживали тысяча двести человек, погибло множество домашнего скота и птицы, из воды подняли девять трупов.

- В ходе наводнения на р. Томь у г. Томск 29 апреля 2010 г. в южной части города гидрологический пост «Гидроствор») уровень воды поднялся примерно на 10 метров, почти на 2 метра превысив критическую отметку. В зоне подтопления оказался пригородный поселок Черная речка: (270 жилых домов, 1102 жителя). По оценкам авторов настоящего обращения (Д.А. Бураков, В.А. Земцов), ледовзрывные работы в черте г. Томска и выше пор течению привели к уплотнению затора и скачкообразному подъему уровня воды в «хвосте» затора.

В настоящее время у населения и администраций республик, краев и областей сформировался стереотип – лед на реках необходимо взрывать для предупреждения наводнения, несмотря на большую стоимость такого мероприятия. Хотя в некоторых СМИ и появляется изредка информация о том, что причины некоторых наводнений вызваны неразумно организованными подрывами ледяного покрова и бомбёжками заторов льда, но отказ от них на местах – явление редкое. Вот единственный пример, который удалось найти: «Сегодня прекращены подрывы ледовых заторов на реке Селенге - главном притоке Байкала. Это решение принято из-за реальной опасности нанести вред омулю. В местах нереста скопилось около двух миллиардов икринок, и взрывы могут погубить потомство промысловой рыбы», – сообщает ИА "Страна.ru" (<http://as.baikal.tv/news/new.html?newsid=200204178&arch=17.04.2002>).

Рассмотрим причины, которые могут приводить к негативным последствиям подрыва ледяного покрова и бомбёжек заторов льда.

Естественное ослабление прочности льда. Весной после перехода температуры воздуха к положительным значениям и схода снега со льда под воздействием солнечной радиации речной лед очень быстро изменяет прочную вертикальную кристаллическую структуру. В нём начинается образование полостей, вертикальных капилляров и пленок талой воды на границах кристаллов льда, В результате лёд приобретает ослабленную игольчатую структуру. Одновременно под действием тепла берегов и стекающей с них относительно теплой воды, образуются закраины – участки чистой воды у берегов. **Чем дольше продолжается воздействие перечисленных естественных процессов, тем сильнее уменьшается прочность льда и снижается вероятность образования мощных заторов во время ледохода.**

К чему приводят искусственные мероприятия по ослаблению ледяного покрова перед вскрытием реки?

Взрывные работы, а также резание ледяного покрова и ледокольные работы, проводимые в значительных масштабах, сокращают период естественной подготовки реки к вскрытию и ускоряют начало ледохода на речном участке, где производятся эти работы. В результате ледоход начинается при прочной структуре льдин, еще не успевших подвергнуться ослабляющему действию солнечной радиации. Образующийся при взрывных работах взломанный лед забивает сечение русла в нижней части участка. Таким образом, предупредительные работы увеличивают вероятность образования затора льда ниже места их проведения и затопления населенных пунктов выше очага затора.

Если перед началом ледохода лед взрывают у многих населенных пунктов на данной реке, то это способствует более раннему началу ледохода и его одновременному развитию по всей длине реки, что ещё более увеличивает опасность мощных заторов вследствие прочной структуры, а также большого объема льда, участвующего в формировании затора.

Работы по ослаблению льда до ледохода следует проводить в районе мостовых переходов (чтобы уменьшить воздействие примерзшего к сооружениям ледяного покрова при вскрытии реки), а также в местах зимних ледовых переправ, и на участках, где толщина льда особенно значительна и у других возможных очагов ледостава, если они расположены ниже по течению населенных пунктов и хозяйственных объектов, которые могут пострадать в случае возникновения заторов льда на этих участках.

К чему может приводить применение метода взрывания (бомбёжек) затора?

Подрыв уже образовавшегося затора может привести к его разрушению при условии взрыва в передней части («голове») затора, где расположены заклинивающие льдины, а также использования зарядов достаточной мощности, и, *главное, наличия ниже по течению большого участка реки с открытой водной поверхностью, на который может сплавляться лёд из разрушенного затора.* Последнее далеко не всегда имеет место, особенно на реках текущих с юга на север. Если ниже затора сохраняется ледяной покров, то в результате подрывов ледяной материал формирует еще более мощное скопление льда у кромки ледостава ниже по течению реки. На практике неоднократно имели место случаи, когда необоснованные подрывы заторов приводили к катастрофическим ситуациям ниже по течению, с человеческими жертвами от «неожиданных» затоплений.

Накопленный на сегодня опыт показывает, что массивированные подрывы заторов приводят к образованию мелкобитого льда, который набивается между более крупными льдинами, и затор становится более плотным, что приводит к уменьшению пропуска воды через тело затора и резкому росту уровня воды в реке в хвосте затора. Кроме того, под воздействием взрывов происходит встряхивание скоплений льда. При этом центр тяжести затора опускается, что делает его еще более устойчивым.

Основные выводы

- Чрезмерные подрывы ледяного покрова в начале половодья сокращают продолжительность периода естественного ослабления льда, что увеличивает вероятность образования затора в ходе местного ледохода ниже места подрыва.
- Как показывает опыт, разрушение затора путем его подрыва в условиях, когда ниже по течению еще сохраняется ледостав, вызывает образование нового еще более мощного затора льда у кромки ледостава.
- Неадекватное применение ледовзрывных работ может стать причиной резкого подъема уровней воды в хвосте затора в результате резкого уплотнения тела затора (за счет образования мелкобитого льда, который набивается между более крупными льдинами, а также за счет проявления «эффекта встряхивания»).
- Наблюдения гидрологов показывают, что взрывные работы не приводят к снижению значений максимальных уровней воды при заторах, определяемых по методикам гидрологического прогноза, основанных на учёте только природных факторов процесса заторообразования.
- Ежегодное проведение противозаторных мероприятий требует больших денежных затрат. Так, для разрушения льда взрывами и ледорезными машинами на площади 300х300 м² при толщине льда 1.5 м требуются затраты в размере примерно 34 млн. рублей, а затраты на бомбометание на той же площади льда составляют около 85 млн. руб. По всем рекам России, на которых проводятся работы по разрушению льда, эти затраты исчисляются многими миллиардами рублей. Экономические потери намного возрастают, если подрывы оказываются неэффективными и приводят к увеличению масштаба наводнения, как, например, в случае с городом Ленском. Велики и экологические потери – страдает рыбное стадо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. По разделу темы 1.7.49, посвященному прогнозам ежедневных уровней воды рек Селенга и Онон для ФГБУ «Забайкальское УГМС», получены следующие результаты и выводы.

- Изучены основные факторы формирования дождевого стока в бассейнах рек Селенга и Онон.
- Разработан физико-статистический метод прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков для рек Онон, Ага и Иля.
- Создан электронный архив многолетних гидрометеорологических данных, необходимых для адаптации программного обеспечения автоматизированного метода прогноза Д.А. Буракова, основанного на применении концептуальной математической модели. (ПО «Капля»).
- Выполнена оптимизация параметров прогностической модели прогноза ежедневных уровней воды для следующих пунктов наблюдений:
 - на р. Онон (В. Ульхун, Бытэв, Оловянная, Чиндат, Чирон);
 - на р. Селенга (Новоселенгинск, Улан-Удэ, Кабанск).
- Качество проверочных прогнозов по материалам наблюдений за 1981 – 2010 г. характеризуется как «удовлетворительное» и «хорошее». Точность прогнозов снижается с приближением к границе с Монголией.
- Для р. Онон при заблаговременности прогноза 2-4 суток получено «хорошее» или близкое к «хорошему» качество прогноза (критерии качества 0,60 – 0,45) в пунктах Оловянная, Чирон, Чиндат.
- Бассейн р. Селенги на площади 65 процентов и более не освещен данными наблюдений. По этой причине качество прогнозов ниже, чем на р. Онон. Критерии качества прогноза при заблаговременности более 2-х суток у Новоселенгинска превышают 0,67 - 0,70. Для г. Улан-Удэ при заблаговременности 2 – 5 суток качество прогнозов оценивается критерием от 0,49 до 0,60, т.е. «хорошее» и «удовлетворительное».
- Разработанный метод прогноза учитывает всю доступную информацию. Существенный вклад в повышение точности прогноза дает учет информации об уровнях воды в 8 и 20 часов. Тем самым учитываются русловые запасы воды на дату выпуска прогноза.
- Разработанный метод предназначен для выпуска прогнозов ежедневных уровней воды в летне-осенний период, после завершения снегового половодья.

- Метод представлен технологической линией прогноза, включающей автоматизированную передачу данных в файлы прогностической программы «hws - Капля» из телеграмм по кодам КН-15 и КН-01.
- Программное обеспечение передано группе гидрологических прогнозов Забайкальского УГМС. Сотрудники группы принимали активное и творческое участие в выполнении темы, освоили работу с программным обеспечением всей технологической цепочки.
- Метод прогноза должен в ноябре 2013 г на 7 Всероссийском гидрологическом съезде (секция 2, подсекция 2.4 «Моделирование гидрологического цикла»).

II. Рассмотрим результаты и выводы, полученные в разделе отчета, посвященному долгосрочному прогнозу максимальных уровней воды весеннего половодья рек, расположенных в пределах территории ответственности ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС», ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», ФГБУ «Среднесибирское УГМС» и ФГБУ «Иркутское УГМС».

- В основу разработки метода прогноза положен физико-статистический подход Л.Г. Шуляковского.
- Максимальные уровни воды формируются под влиянием факторов, определяющих временной ход притока воды в русловую сеть с одной стороны, и факторов, определяющих образование шуголедяных «пробок» в русле – с другой.
- Атмосферные процессы и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и прибыли воды в реках носят инерционный характер, т.е. начальные тенденции их развития характеризуют последующий ход вскрытия реки, включая образование и мощность заторов льда. Весеннее потепление и сроки вскрытия рек Сибири определяются главным образом тем, возникает ли в марте над этой территорией юго-западный и западный перенос воздушных масс, обуславливающий общее потепление, или сохраняется восточносибирский антициклон с гребнями, направленными на запад и северо-восток [1, 12].
- Конкретный набор предикторов и вид регрессионных уравнений индивидуальны для каждого участка реки в связи с различием условий образования заторов льда. Все используемые предикторы – это комплексные показатели взаимодействия атмосферы, бассейна и русла. Выделить индивидуальную степень их влияния в общем физическом процессе не всегда удастся.
- Набор предикторов определяется сначала из физических соображений. Далее проверяется их репрезентативность на основе корреляции с максимальными уровнями воды.

- Запасы воды в снеге в пунктах наблюдений характеризуют количество поступившей на водосбор талой воды.
- Уровни воды на дату появления ледовых образований или на дату установления ледостава, минимальный и максимальный уровни за зимний период, а также превышение максимального уровня над уровнем воды на момент установления ледостава, – отражают ледовые условия, наличие зажоров льда в зимний период и пропускную способность русла.
- Максимальная толщина льда указывает на его объем и прочность и предопределяет «заторность» процесса вскрытия.
- Осенний сток характеризует запасы влаги и льдистость почвы к моменту начала снеготаяния, а также водность реки в период замерзания.
- Показатели температуры воздуха в марте и тенденции температуры косвенно характеризует будущие особенности развития потепления, а разница температуры воздуха в пунктах верхнего и нижнего течения отражает неодновременность развития процессов вскрытия по длине реки и роль механического фактора.
- Количество весенних осадков отражает дополнительное поступление воды и косвенно, – влажность воздуха и потери воды на испарение.

Предложенный путь позволяет использовать преимущества физического подхода (на этапе «конструирования» обобщенных показателей), и объективного статистического анализа (на этапе получения прогностических уравнений). Важно подчеркнуть, что предложенные уравнения применяются при любом характере развития весенних ледовых процессов, включая случаи формирования заторов льда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974, 198 с.
2. Бузин В.А. Методы прогнозов зажорных и заторных явлений.– Труды пятого всесоюзного гидрологического съезда, 1989, том 7.–Л: Гидрометеиздат.
3. Бураков Д. А. Математическая модель расчета весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология .- 1978. –№ 1. –с. 49-59.
4. Бураков Д. А., Авдеева Ю. В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология .- 1996–№10. –с. 75-87.
5. Бураков Д.А., Адамович А.А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС с применением математической модели. // Метеорология и гидрология, 2006. - №1, - с, 95 – 105.
6. Бураков Д. А., Гордеев И. Н., Ромасько В. Ю. Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидролого-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Том 7 № 2. – с. 113–121.
7. Бураков Д.А., Ковшова Е.П. Прогноз элементов зимнего режима реки Енисей на участках перемещения кромки ледостава в нижних бьефах Красноярской и Усть-Илимской ГЭС. Гидрометеорология Сибири. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат,- вып.103. 2000, стр.135-144.
8. Бураков Д.А., Ковшова Е.П. Исследование и прогнозы высоких заторно-зажорных уровней воды на реке Енисей в зарегулированных условиях. Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Вып.3. Красноярск: КНИИиМС, 2001, стр.65-69 (соавтор).
9. Бураков Д. А., Космакова В. Ф., Гордеев И. Н. Результаты испытания физико-статистического метода долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М., 2012, с. 121 – 126.
10. Бураков Д. А., Ковшова Е. П., Ромасько В. Ю. Прогноз элементов ледового режима р. Енисей в осенне-зимний период в нижних бьефах высоконапорных ГЭС // Метеорология и гидрология, – № 5. 2008, с. 93-102.

11. Кореньков В.А., Бураков Д.А., Ковшова Е.П., Младенцева Л.А. Проблемы паводков и затоплений. Безопасность России. Региональные проблемы безопасности. Красноярский край».- М.: МГФ «Знание». 2001.- стр.123-136, 159-162.
12. Лобовикова З.П. Долгосрочные прогнозы сроков ледовых явлений на реках и водохранилищах Дальнего Востока. /В сб.: Труды V Всесоюзного Гидрологического съезда, т.7. – Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 251-256.
13. Линслей Р., Колер М., Паулюс Д. Прикладная гидрология, – Л.: Гидрометеиздат, 1962 – 759 с.
14. Марченко О.Ю., Бережных Т.В., Мордвинов В. И. Экстремальная водность реки Селенги и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология, 2012, №10, с. 81-93.
15. Попов Е. Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Гидрометеиздат, М.: 1963.– 256 с.
16. Шуляковский Л.Г., Еремина В.А. К методике прогноза заторных уровней воды.– Метеорология и гидрология, 1952, №1, с.46-51.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Статистические методики прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков

1) р. Ага – с. Агинское (бассейн р. Онон, $F = 2\,190 \text{ км}^2$).

Установлена связь максимальных уровней воды дождевых паводков с количеством паводкообразующих осадков (определены по данным двух пунктов: Агинское и Иля) и показателем увлажнения (m) – уровнем воды р. Ага – Агинское в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (таблица А.1).

Таблица А.1 – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Ага – с. Агинское

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,831$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 32,4 \text{ см}$ Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 67,3 \text{ см}$ Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 0,674 \sigma = 45,4 \text{ см}$ Критерий качества методики прогноза $S / \sigma = 0,48$		
Вид уравнения: $y = a_1 x + a_2 m + b$ где $x = 0,57x_{\text{Агинское}} + 0,43x_{\text{Иля}}$		t -статистики
a_1	1.681	6.58
a_2	1.185	6.79
b	-59.79	-1.50

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Ага – с. Агинское

$$H_{\max} = 1.681 x + 1.185 m - 59.79. \quad (\text{А.1})$$

В таблице А.2 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (А.1). Критерий качества этой методики $S / \sigma = 0.48$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Пример. Рассчитаем максимальный уровень воды для паводка, который произошел на р. Ага – с.Агинское в первой половине июля 1990 года. Обратимся к имеющимся данным за этот период (таблица А.3).

Таблица А.2 – Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков р. Ага – с. Агинское

№	Годы	Дата начала выпадения паводкообразующих осадков	x	m	$H_{\max_{\text{факт}}}$	$H_{\max_{\text{пр}}}$	Ошибки прогноза
1	2003	июл 24	63.9	175	199.0	255.0	-56.0 *)
2	2003	июл 31	36.3	191	196.0	227.5	-31.5
3	2003	авг 15	45.4	200	231.0	253.5	-22.5
4	1998	июн 23	89.8	209	282.0	338.8	-56.8
5	1998	июл 19	42.4	202	240.0	250.8	-10.8
6	1998	июл 24	59.2	246	360.0	331.3	28.7
7	1998	авг 09	19.0	309	339.0	338.3	0.7
8	1996	июн 06	23.6	191	200.0	206.2	-6.2
9	1996	июн 18	12.8	194	205.0	191.6	13.4
10	1996	июн 28	15.3	196	214.0	198.3	15.7
11	1996	июл 04	38.8	210	234.0	254.2	-20.2
12	1996	июл 09	49.8	228	257.0	294.2	-37.2
13	1996	авг 05	16.6	216	241.0	224.0	17.0
14	1995	июн 20	27.6	199	252.0	222.5	29.5
15	1993	июл 15	21.3	215	254.0	230.8	23.2
16	1993	июл 23	50.9	206	290.0	269.9	20.1
17	1992	июн 21	21.4	180	213.0	189.4	23.6
18	1992	июл 30	36.4	173	196.0	206.4	-10.4
19	1991	июл 06	50.8	204	271.0	267.4	3.6
20	1991	июл 16	71.6	208	300.0	307.0	-7.0
21	1990	июн 22	37.1	215	307.0	257.3	49.7
22	1990	июл 05	74.1	246	370.0	356.2	13.8
23	1990	авг 17	45.8	243	305.0	305.2	-0.2
24	1988	июл 07	46.9	218	282.0	277.4	4.6
25	1988	июл 21	60.6	288	406.0	383.4	22.6
26	1988	июл 27	38.4	316	332.0	379.2	-47.2
27	1986	июл 08	39.7	227	243.0	275.9	-32.9
28	1985	июн 06	88.7	210	328.0	338.2	-10.2
29	1984	авг 18	110.0	216	464.0	381.2	82.8

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

Судя по данным наблюдений, существенные осадки, которые могли сформировать паводок, выпали с 5 по 7 июля 1990г. Для прогноза максимального уровня находим среднюю взвешенную по площади водосбора сумму осадков $x = 0.57x_{\text{Агинское}} + 0.43x_{\text{Иля}}$ (таблица А.1), то есть складываем осадки за эти три дня по каждому пункту (с умножением на соответствующие весовые коэффициенты): $x = 0.57 \times (7.4 + 14.7 + 45.9) + 0.43 \times (19.4 + 29.5 + 33.2) = 74.1$ мм.

Показатель предпаводочного увлажнения (m) – уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков (5 июля 1990 г), согласно табл. 1.3, равен $H = 246$ см.

Таблица А.3 – Исходные данные наблюдений

Дата	Осадки (х,мм)		Уровень воды (см)
	с. Агинское	с.Иля	Н _{08:00} р.Ага- с.Агинское
01 июл 1990	43.1	53.5	223.0
02 июл 1990	7.8	7.3	265.0
03 июл 1990	0.0	0.0	253.0
04 июл 1990	0.0	0.0	243.0
05 июл 1990	7.4	19.4	246.0
06 июл 1990	14.7	29.5	246.0
07 июл 1990	45.9	33.2	256.0
08 июл 1990	8.5	6.0	370.0
09 июл 1990	9.5	10.6	298.0
10 июл 1990	0.0	0.0	291.0
11 июл 1990	0.0	1.1	282.0
12 июл 1990	0.5	0.0	280.0
13 июл 1990	0.0	0.0	257.0
14 июл 1990	6.0	1.5	238.0
15 июл 1990	11.6	26.1	255.0

Подставим в уравнение А.1 эти данные ($H_{\max} = 1.681 x + 1.185 m - 59.793$).

Получим следующий результат:

$$H_{\max} = 1.681 \times 74.1 + 1.185 \times 246 + (-59.793) = 356.3 \text{ (см)}.$$

Фактический максимальный уровень воды наблюдался 8 июля и составил 370 см (таблица А.3). Ошибка прогноза ($\Delta = 370.0 - 356.3 = 13.7$ см) меньше допустимой (45.4 см, таблица А.6).

2) р. Иля – с. Иля (бассейн р. Онон, $F = 1\,370 \text{ км}^2$).

Установлена связь максимальных уровней воды дождевых паводков с количеством паводкообразующих осадков (определены по данным двух пунктов: Иля и Агинское) и показателем увлажнения (m) – уровнем воды р. Иля – с. Иля в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t-статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (таблица А.7).

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Иля – с. Иля

$$H_{\max} = 1.061 x + 1.251 m - 8.040. \quad (\text{А.2})$$

В таблице А.8 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (А.2). Критерий качества этой методики $S/\sigma = 0.49$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Таблица А.7. – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков (H_{max} , см) р. Иля – с. Иля

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Иля – с. Иля в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,878$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 27,4$ см Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 55,4$ см Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 0,674 \sigma = 37,3$ см Критерий качества методики прогноза $S / \sigma = 0,49$		
Вид уравнения: $y = a_1 x + a_2 m + b$ где $x = 0,90x_{Иля} + 0,05x_{Агинское} + 0,05x_{Акса}$		t-статистики
a_1	1.061	6.607
a_2	1.251	5.372
b	-8.040	-0.356

Таблица А.8– Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков р. Иля – с. Иля

№	Год	Дата начала выпадения паводкообразующих осадков	x	m	$H_{max_{факт}}$	$H_{max_{пр}}$	Ошибки прогноза
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2010	июл 15	46.7	74	130.0	134.1	-4.1
2	2008	июл 15	22.7	98	118.0	138.6	-20.6
3	2003	авг 01	45.2	89	135.0	151.3	-16.3
4	2001	авг 04	20.6	78	95.0	111.4	-16.4
5	2001	авг 16	56.0	84	147.0	156.4	-9.4
6	1998	июн 15	23.1	65	90.0	97.8	-7.8
7	1998	июн 20	22.5	85	104.0	122.2	-18.2
8	1998	июн 23	80.4	99	175.0	201.1	-26.1
9	1998	июл 19	37.5	80	134.0	131.8	2.2
10	1998	июл 25	95.3	122	341.0	245.7	95.3
11	1998	авг 01	84.8	168	259.0	292.1	-33.1
12	1997	июн 06	16.4	86	116.0	117.0	-1.0
13	1996	июн 06	13.2	75	96.0	99.8	-3.8
14	1996	июн 09	17.1	90	126.0	122.7	3.3
15	1996	июл 02	44.5	75	142.0	133.0	9.0
16	1996	июл 08	29.7	128	152.0	183.6	-31.6
17	1996	авг 05	20.5	97	130.0	135.0	-5.0
18	1995	июн 16	9.4	103	146.0	130.8	15.2
19	1995	июн 20	10.4	114	163.0	145.6	17.4
20	1995	июл 09	28.7	116	150.0	167.6	-17.6
21	1994	июн 25	7.7	74	91.0	92.7	-1.7
22	1994	июл 04	32.2	75	152.0	120.0	32.0
23	1993	июл 15	20.3	85	119.0	119.8	-0.8
24	1991	июл 16	71.0	104	212.0	197.4	14.6
25	1991	авг 04	18.7	110	138.0	149.4	-11.4
26	1988	июл 06	69.9	104	215.0	196.3	18.7

Продолжение таблицы А8

1	2	3	4	5	6	7	8
27	1988	июл 21	36.7	130	187.0	193.6	-6.6
28	1987	июл 09	62.6	105	186.0	189.8	-3.8
29	1985	июн 06	31.1	111	232.0	163.8	68.2
30	1985	июл 21	67.4	95	182.0	182.3	-0.3
31	1985	авг 17	40.8	130	189.0	197.8	-8.8
32	1984	авг 18	157.1	92	242.0	273.7	-31.7

Пример. Рассчитаем максимальный уровень воды для паводка, который произошел на р.Иля-с.Иля в первой половине июля 1987 года. Обратимся к имеющимся данным за этот период (таблица А.9). Судя по данным наблюдений, существенные осадки, которые могли сформировать паводок, выпали с 9 по 11 июля 1987г. Для прогноза максимального уровня находим среднюю взвешенную по площади водосбора сумму осадков $x = 0.90x_{Иля} + 0.05x_{Агинское} + 0.05x_{Акса}$ (таблица А.7), т.е. складываем осадки за эти три дня по каждому пункту (с умножением на соответствующие весовые коэффициенты):

$$x = 0.90 \times (11.6 + 29.1 + 25.7) + 0.05 \times (0.0 + 2.0 + 0.0) + 0.05 \times (9.7 + 12.0 + 33.9) = 62.6 \text{ мм.}$$

Показатель предпаводочного увлажнения (m) – уровень воды р. Иля – с. Иля в день выпадения осадков (9 июля 1987 г), согласно табл. 2.3, равен $H = 105$ см.

Таблица А.9– Исходные данные наблюдений

Дата	Осадки (х,мм)			Уровень воды (см) $H_{08:00}$ р.Иля-с.Иля
	с.Иля	с.Агинское	с.Акса	
01 июл 1987	6.6	1.6	2.7	65.0
02 июл 1987	0.3	1.4	0.0	66.0
03 июл 1987	0.0	1.9	0.0	65.0
04 июл 1987	3.0	0.0	0.0	65.0
05 июл 1987	0.0	0.0	0.0	68.0
06 июл 1987	0.0	0.0	0.0	68.0
07 июл 1987	16.7	0.0	9.9	69.0
08 июл 1987	0.0	0.0	0.4	73.0
09 июл 1987	11.6	0.0	9.7	105.0
10 июл 1987	29.1	2.0	12.0	109.0
11 июл 1987	25.7	0.0	33.9	151.0
12 июл 1987	0.0	0.0	0.0	179.0
13 июл 1987	0.0	0.0	0.0	186.0
14 июл 1987	0.0	2.1	0.1	147.0
15 июл 1987	0.0	5.3	0.1	123.0

Подставим в уравнение А.2 эти данные ($H_{\max} = 1.061 x + 1.251 m - 8.040$).

Получим следующий результат:

$$H_{\max} = 1.061 \times 62.6 + 1.251 \times 105 + (-8.040) = 189.8 \text{ (см).}$$

Фактический максимальный уровень воды наблюдался 13 июля и составил 186 см (таблица А.9). Ошибка прогноза ($\Delta = 186 - 189.8 = -3.8$ см) меньше допустимой (37,3 см, таблица А.8).

3) р. Онон – с. Верхний Ульхун (бассейн р. Онон, $F = 45\,000\text{ км}^2$).

Установлена связь максимальных уровней воды дождевых паводков с количеством паводкообразующих осадков (определены по данным двух пунктов: Кыра и Мангут) и показателем увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Верхний Ульхун в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции составляет 0,79 (таблица А.10).

Таблица А.10 – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Онон – с. Верхний Ульхун.

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Онон – с. Верхний Ульхун в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,795$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 38.6$ см Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 62.46$ см Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 0.674\sigma = 42.1$ см Критерий качества методики прогноза $S/\sigma = 0,62$		
Вид уравнения: $y = a_1x + a_2m + b$ где $x = 0.50x_{\text{Кыра}} + 0.50x_{\text{Мангут}}$		t -статистики
a_1	1.338	6.408
a_2	0.521	6.128
b	119.749	6.495

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Онон – с. Верхний Ульхун

$$H_{\max} = 1.338x + 0.521m + 119.749. \quad (\text{А.3})$$

В таблице А.11 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (А.3). Критерий качества этой методики $S/\sigma = 0.62$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Таблица А.11 – Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков
р. Онон – с. Верхний Ульхун

№	Год	Дата начала выпадения паводкообразующих осадков	х	т	Н _{махфакт}	Н _{махпр}	Ошибки прогноза
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2010	май 27	47.8	193	280.0	284.2	-4.2
2	2009	июн 26	26.4	167	313.0	242.1	70.9
3	2005	май 30	13.1	139	273.0	209.6	63.4
4	2005	июн 04	22.9	271	273.0	291.5	-18.5
5	2002	июн 07	5.2	114	156.0	186.1	-30.1
6	2002	июл 10	69.1	112	217.0	270.5	-53.5
7	2001	авг 04	29.2	104	249.0	213.0	36.0
8	2001	авг 16	51.8	178	325.0	281.7	43.3
9	2000	июл 19	13.9	99	153.0	189.8	-36.8
10	2000	июл 27	17.9	132	163.0	212.4	-49.4
11	1999	июн 12	28.4	99	176.0	209.3	-33.3
12	1999	июн 20	16.6	155	214.0	222.6	-8.6
13	1998	июн 23	79.9	142	231.0	300.6	-69.6
14	1998	июл 23	106.8	165	378.0	348.6	29.4
15	1997	авг 06	43.6	186	314.0	274.9	39.1
16	1997	авг 22	26.8	186	219.0	252.5	-33.5
17	1996	июл 02	51.7	180	253.0	282.7	-29.7
18	1996	июл 08	38.9	253	280.0	303.6	-23.6
19	1996	июл 27	40.9	163	284.0	259.4	24.6
20	1995	июн 15	26.8	173	296.0	245.7	50.3
21	1995	авг 05	29.4	213	228.0	270.0	-42.0
22	1995	авг 10	24.9	213	263.0	264.0	-1.0
23	1994	июн 21	46.4	102	259.0	235.0	24.0
24	1994	июл 03	82.0	219	353.0	343.5	9.5
25	1994	авг 19	31.9	251	287.0	293.2	-6.2
26	1994	сен 02	48.5	209	315.0	293.5	21.5
27	1993	июл 15	29.6	218	235.0	272.8	-37.8
28	1993	сен 03	40.6	219	288.0	288.1	-0.1
29	1992	авг 15	12.9	195	209.0	238.5	-29.5
30	1992	сен 03	42.1	266	275.0	314.6	-39.6
31	1991	май 26	12.9	140	232.0	209.9	22.1
32	1991	июл 05	92.0	121	335.0	305.8	29.2
33	1991	авг 30	12.7	171	223.0	225.7	-2.7
34	1991	сен 03	7.3	223	229.0	245.7	-16.7
35	1991	сен 16	24.2	183	258.0	247.5	10.5
36	1990	июл 05	62.9	156	397.0	285.2	111.8
37	1990	авг 07	56.2	232	310.0	315.7	-5.7
38	1990	авг 16	29.5	280	287.0	305.1	-18.1
39	1990	сен 15	14.2	242	254.0	264.7	-10.7
40	1990	сен 19	14.1	249	258.0	268.3	-10.3
41	1989	авг 05	26.7	158	183.0	237.8	-54.8
42	1989	авг 14	43.6	160	255.0	261.4	-6.4
43	1988	май 29	12.2	124	262.0	200.7	61.3

Продолжение таблицы А.11

1	2	3	4	5	6	7	8
44	1988	июл 06	48.3	318	372.0	350.0	22.0
45	1988	июл 20	36.0	237	302.0	291.4	10.6
46	1988	сен 05	11.3	394	399.0	340.0	59.0
47	1987	сен 08	30.8	172	194.0	250.6	-56.6
48	1987	авг 12	12.6	184	218.0	232.4	-14.4
49	1986	авг 20	47.6	101	234.0	236.1	-2.1
50	1986	авг 29	36.5	233	327.0	290.0	37.0
51	1985	авг 02	135.3	324	430.0	469.5	-39.5
52	1985	авг 24	34.2	279	320.0	310.8	9.2

Пример. Рассчитаем максимальный уровень воды для паводка, который произошел на р. Онон – с. Верхний Ульхун в первой половине июля 1994 года. Обратимся к имеющимся данным за этот период (таблица А.12).

Судя по данным наблюдений, существенные осадки, которые могли сформировать паводок, выпали с 3 по 5 июля 1994г. Для прогноза максимального уровня находим среднюю взвешенную по площади водосбора сумму осадков где $x = 0.50x_{\text{Кыра}} + 0.50x_{\text{Мангут}}$ (таблица А.10), т.е. складываем осадки за эти три дня по каждому пункту (с умножением на соответствующие весовые коэффициенты):

$$x = 0.50 \times (7.8 + 64.4 + 10.3) + 0.50 \times (0.8 + 68.5 + 12.2) = 82.1 \text{ мм.}$$

Показатель предпаводочного увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Верхний Ульхун в день выпадения осадков (3 июля 1994 г), согласно таблица А.12, равен $H = 219 \text{ см.}$

Таблица А.12. – Исходные данные наблюдений

Дата	Осадки (х,мм)		Уровень воды (Н,см)
	с.Кыра	с.Мангут	Н _{08:00} р. Онон – с. Верхний Ульхун
01 июл 1994	0.8	2.4	222.0
02 июл 1994	0.0	0.0	220.0
03 июл 1994	7.8	0.8	219.0
04 июл 1994	64.4	68.5	217.0
05 июл 1994	10.3	12.2	240.0
06 июл 1994	0.0	0.0	282.0
07 июл 1994	0.0	0.0	327.0
08 июл 1994	0.0	8.3	353.0
09 июл 1994	0.0	0.0	326.0
10 июл 1994	0.0	0.0	270.0
11 июл 1994	4.2	0.0	250.0
12 июл 1994	1.6	0.0	230.0
13 июл 1994	0.8	0.0	219.0
14 июл 1994	0.0	0.0	215.0
15 июл 1994	0.0	0.0	208.0

Подставим в уравнение А.3 эти данные ($H_{\max} = 1.338 x + 0.521 m + 119.749$).

Получим следующий результат:

$$H_{\max} = 1.338 \times 82.1 + 0.521 \times 219 + 119.749 = 343.7 \text{ (см)}.$$

Фактический максимальный уровень воды наблюдался 8 июля и составил 353 см (таблица А.12). Ошибка прогноза ($\Delta = 353.0 - 343.7 = 9.3$ см) меньше допустимой (42.1 см, таблица А.10).

4) р. Онон – с. Оловянная (бассейн р. Онон, $F = 75 \text{ } 100 \text{ км}^2$).

Установлена связь максимальных уровней воды дождевых паводков с количеством паводкообразующих осадков (по следующим пунктам: Кыра, Борзя, Мангут.) и показателем увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Оловянная в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t-статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (таблица А.13).

Таблица А.13 – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Онон – с. Оловянная

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Онон – с. Оловянная в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,871$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 31.98$ см Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 62.62$ см Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 0.674 \sigma = 42.2$ см Критерий качества методики прогноза $S / \sigma = 0,51$		
Вид уравнения: $y = a_1 x + a_2 m + b$ где $x = (x_{\text{Кыра}} + x_{\text{Борзя}} + x_{\text{Мангут}}) / 3$.		t-статистики
a_1	1.986	6.037
a_2	0.608	6.431
b	55.145	2.829

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков ($H_{\max}$, см) р. Онон – с. Оловянная

$$H_{\max} = 1.986 x + 0.608 m + 55.145. \quad (\text{А.4})$$

В таблице А.14 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (А.4). Критерий качества этой методики $S / \sigma = 0.51$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Таблица А.14 – Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков
р. Онон – с. Оловянная

№	Год	Дата начала выпадения паводкообразующих осадков	x	m	$H_{\max_{\text{факт}}}$	$H_{\max_{\text{пр}}}$	Ошибки прогноза
1	2010	май 27	36.4	197	229.0	247.1	-18.1
2	2005	июн 12	36.7	193	229.0	245.3	-16.3
3	2002	июн 10	7.0	115	127.0	139.0	-12.0
4	2002	июл 10	50.2	85	177.0	206.5	-29.5
5	2001	авг 05	13.7	78	134.0	129.7	4.3
6	2001	авг 16	36.0	134	189.0	208.1	-19.1
7	2000	июл 27	22.4	68	116.0	140.9	-24.9
8	1999	июн 12	20.0	105	141.0	158.7	-17.7
9	1999	июн 20	11.0	120	168.0	150.0	18.0
10	1998	июн 23	56.5	137	183.0	250.7	-67.7
11	1998	июл 23	73.7	130	341.0	280.4	60.6
12	1997	авг 06	33.7	144	187.0	209.6	-22.6
13	1997	авг 24	13.3	181	178.0	191.5	-13.5
14	1996	июл 27	29.4	187	232.0	227.2	4.8
15	1991	июл 05	62.4	99	238.0	239.3	-1.3
16	1991	авг 30	13.8	173	192.0	187.6	4.4
17	1991	сен 03	9.9	171	196.0	178.7	17.3
18	1991	сен 16	15.0	183	202.0	196.1	5.9
19	1990	июл 05	61.8	142	350.0	264.2	85.8
20	1990	авг 07	41.5	253	283.0	291.3	-8.3
21	1990	авг 17	27.1	301	308.0	291.8	16.2
22	1990	сен 19	9.4	250	239.0	225.6	13.4
23	1988	май 29	12.8	119	185.0	152.8	32.2
24	1988	июл 06	51.7	236	279.0	301.2	-22.2
25	1988	июл 21	31.7	313	300.0	308.3	-8.3
26	1988	авг 31	51.1	230	286.0	296.3	-10.3
27	1986	авг 23	33.4	110	175.0	188.4	-13.4
28	1986	авг 29	24.3	119	231.0	175.8	55.2

Пример. Рассчитаем максимальный уровень воды для паводка, который произошел на р. Онон – с. Оловянная в июле 1991 года. Обратимся к имеющимся данным за этот период (таблица А.15).

Судя по данным наблюдений, существенные осадки, которые могли сформировать паводок, выпали с 5 по 8 июля 1991г. Для прогноза максимального уровня находим среднюю сумму осадков, где $x = (x_{\text{Кыра}} + x_{\text{Борзя}} + x_{\text{Мангут}}) / 3$ (таблица А.13), т.е. складываем осадки за эти четыре дня по каждому пункту отдельно и после складываем получившиеся значения по всем пунктам, находим среднее:

$$x = [(36.2 + 35.0 + 37.4 + 10.1) + (0.0 + 4.0 + 1.9 + 0.0) + (10.9 + 35.8 + 11.6 + 4.4)] / 3 = 62.4 \text{ мм.}$$

Показатель предпаводочного увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Оловянная в день выпадения осадков (5 июля 1991 г), согласно таблица А.15, равен $H = 99$ см.

Таблица А.15 – Исходные данные наблюдений

Дата	Осадки (х,мм)				Уровень воды (Н,см)
	х Кыра	х Борзя	х Мангут	Ср. х	$H_{08:00}$ р. Онон – с. Оловянная
01 июл 1991	2.4	7.7	0.0	3.4	100.0
02 июл 1991	3.5	9.8	1.6	5.0	100.0
03 июл 1991	0.0	2.3	0.0	0.8	101.0
04 июл 1991	0.0	3.4	0.0	1.1	100.0
05 июл 1991	36.2	0.0	10.9	15.7	99.0
06 июл 1991	35.0	4.0	35.8	24.9	98.0
07 июл 1991	37.4	1.9	11.6	17.0	99.0
08 июл 1991	10.1	0.0	4.4	4.8	103.0
09 июл 1991	2.5	0.3	0.0	0.9	111.0
10 июл 1991	0.0	0.0	0.0	0.0	138.0
11 июл 1991	0.4	0.0	0.0	0.1	167.0
12 июл 1991	1.3	3.2	0.0	1.5	177.0
13 июл 1991	0.0	1.9	0.0	0.6	210.0
14 июл 1991	0.0	18.7	0.0	6.2	225.0
15 июл 1991	0.0	0.0	8.3	2.8	230.0
16 июл 1991	17.3	0.0	7.8	8.4	238.0
17 июл 1991	10.2	8.5	0.0	6.2	251.0
18 июл 1991	0.0	0.7	0.0	0.2	256.0

Подставим в уравнение А.4 эти данные ($H_{\max} = 1.986 x + 0.608 m + 55.145$).

Получим следующий результат:

$$H_{\max} = 1.986 \times 62.4 + 0.608 \times 99 + 55.145 = 239.3 \text{ см.}$$

Фактический уровень воды этого паводка наблюдался 16 июля (дата начала следующего паводкообразующего дождя) и составил 238.0 см (таблица А.15). Ошибка прогноза ($\Delta = 238.0 - 239.3 = -1.3$ см) меньше допустимой (42.2 см, таблица А.13).

5. р. Онон – с. Чирон (бассейн р. Онон, $F = 95\,900 \text{ км}^2$)

Установлена связь максимальных уровней воды дождевых паводков с количеством паводкообразующих осадков (по следующим пунктам: Кыра, Борзя, Мангут.) и показателем увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Чирон в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями t-статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (таблица А.16).

Таблица А.16 – Уравнение регрессии для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков (H_{max} , см) р. Онон – с. Чирон

Показатель увлажнения m - уровень воды р. Онон – с. Чирон в день выпадения осадков		
Множественный $R = 0,883$ Средняя квадратичная ошибка прогноза $S = 49.81$ см Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 101.82$ см Допустимая ошибка прогноза $\Delta_d = 0.674 \sigma = 68.6$ см Критерий качества методики прогноза $S / \sigma = 0,49$		
Вид уравнения: $y = a_1 x + a_2 m + b$ где $x = (x_{\text{Кыра}} + x_{\text{Борзя}} + x_{\text{Мангут}}) / 3.$		t- статистики
a_1	2.971	5.780
a_2	0.868	6.680
b	33.639	0.540

Уравнение для прогноза максимальных уровней воды дождевых паводков (H_{max} , см) р. Онон – с. Чирон

$$H_{max} = 3.034 x + 0.921 m + 9.857. \quad (A.5)$$

В таблице А.17 представлены исходные данные и результаты прогноза по уравнению (А.5). Критерий качества этой методики $S / \sigma = 0.49$, т.е. методика оценивается как «хорошая».

Таблица А.17 – Проверочные прогнозы максимальных уровней воды дождевых паводков р. Онон – с. Чирон

№	Год	Дата начала выпадения паводкообразующих осадков	x	m	$H_{max_{факт}}$	$H_{max_{пр}}$	Ошибки прогноза
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2010	май 27	36.4	467	492.0	547.1	-55.1
2	2005	июн 12	36.7	471	509.0	551.6	-42.6
3	2002	июн 10	7.0	405	422.0	406.1	15.9
4	2002	июл 10	50.2	391	434.0	522.2	-88.2
5	2001	авг 05	13.7	390	400.0	412.8	-12.8
6	2001	авг 16	36.0	400	432.0	487.8	-55.8
7	2000	июл 27	22.4	393	418.0	441.4	-23.4
8	1999	июн 12	20.0	412	441.0	450.8	-9.8
9	1999	июн 20	11.0	408	463.0	420.6	42.4
10	1998	июн 23	56.5	440	493.0	583.6	-90.6
11	1998	июл 23	73.7	447	712.0	640.6	71.4
12	1997	авг 06	33.7	434	530.0	510.5	19.5
13	1997	авг 24	13.3	499	460.0	506.3	-46.3

Продолжение таблицы А.17

14	1991	июл 05	62.4	400	646.0	566.4	79.6
15	1991	авг 30	13.8	460	478.0	473.9	4.1
16	1991	сен 03	9.9	448	493.0	452.0	41.0
17	1991	сен 16	15.0	481	507.0	495.8	11.2
18	1990	июл 05	61.8	504	713.0	654.9	58.1
19	1990	авг 07	41.5	572	627.0	653.5	-26.5
20	1990	авг 17	27.1	627	658.0	658.5	-0.5
21	1990	сен 19	9.4	575	570.0	560.6	9.4
22	1988	май 29	12.8	444	473.0	457.0	16.0
23	1988	июл 06	51.7	551	598.0	665.6	-67.6
24	1988	июл 21	31.7	651	716.0	693.1	22.9
25	1988	авг 31	51.1	547	711.0	660.2	50.8
26	1986	авг 23	33.4	398	486.0	478.5	7.5
27	1986	авг 29	24.3	395	518.0	448.8	69.2

Примечание - красным шрифтом выделены не оправдавшиеся прогнозы.

Пример. Рассчитаем максимальный уровень воды для паводка, который произошел на р. Онон – с. Чирон в августе 1990 года. Обратимся к имеющимся данным за этот период (таблица А.18).

Судя по данным наблюдений, существенные осадки, которые могли сформировать паводок, выпали с 7 по 9 августа 1990г. Для прогноза максимального уровня находим среднюю сумму осадков, где $x = (x_{\text{Кыра}} + x_{\text{Борзя}} + x_{\text{Мангут}}) / 3$ (табл. А.16), т.е. складываем осадки за эти три дня по каждому пункту отдельно и после складываем получившиеся значения по всем пунктам, находим среднее:

$$x = [(14.2 + 37.7 + 3.1) + (4.8 + 8.4 + 6.3) + (3.6 + 30.4 + 16.0)] / 3 = 41.5 \text{ мм.}$$

Показатель предпаводочного увлажнения (m) – уровень воды р. Онон – с. Чирон в день выпадения осадков (7 августа 1990 г), согласно таблице А.18, равен $H = 572$ см.

Подставим в уравнение А.5 эти данные ($H_{\text{max}} = 3.034 x + 0.921 m + 9.857$).

Получим следующий результат:

$$H_{\text{max}} = 3.034 \times 41.5 + 0.921 \times 572.0 + 9.857 = 662.6 \text{ см.}$$

Фактический максимальный уровень воды этого паводка наблюдался 16 августа и составил 627.0 см (таблица А.18). Ошибка прогноза ($\Delta = 627.0 - 662.6 = -35.6$ см) меньше допустимой (68.6 см, таблица А.16).

Таблица А.18 – Исходные данные наблюдений

Дата	Осадки (х,мм)				Уровень воды (Н,см)
	х Кыра	х Борзя	х Мангут	Ср. х	Н _{08:00} р. Онон – с. Чирон
06 авг	0.0	0.0	0.0	0.0	578.0
07 авг	14.2	4.8	3.6	7.5	572.0
08 авг	37.7	8.4	30.4	25.5	568.0
09 авг	3.1	6.3	16.0	8.5	565.0
10 авг	4.9	1.3	2.4	2.9	580.0
11 авг	0.0	7.8	0.0	2.6	587.0
12 авг	1.8	0.3	0.0	0.7	604.0
13 авг	7.4	0.0	7.4	4.9	618.0
14 авг	0.0	10.0	0.0	3.3	624.0
15 авг	2.2	0.0	0.0	0.7	626.0
16 авг	5.6	0.0	0.7	2.1	627.0
17 авг	5.1	12.6	5.2	7.6	627.0
18 авг	24.1	18.2	16.1	19.5	627.0
19 авг	0.0	1.8	0.0	0.6	667.0
20 авг	0.0	0.0	0.0	0.0	687.0
21 авг	0.0	0.3	0.0	0.1	700.0
22 авг	3.6	0.0	0.0	1.2	703.0