Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

**Уйманова Валерия Александровна**

# МОНИТОРИНГ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ МАЙМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАВОДНЕНИЯ

25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор, Зуев Владимир Владимирович

Томск – 2021

# Оглавление

**ВВЕДЕНИЕ ..... 4**

**ГЛАВА 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА РЕКИ МАЙМА ..... 11**

1.1 Географическое положение, геологическое строение и рельеф ..... 12

1.2 Климатические условия ..... 14

1.3 Гидрологическая характеристика бассейна ..... 16

1.4 Характеристика почвенно-растительного покрова ..... 18

1.5 Характеристика антропогенной нагрузки ..... 20

Выводы по главе 1 ..... 21

**ГЛАВА 2 ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ МАЙМА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ..... 22**

2.1 Температура воздуха и осадки ..... 22

2.2 Водный режим ..... 26

2.2.1 Многолетние изменения годового и сезонного стока ..... 30

2.3 Уровенный режим ..... 38

2.3.1 Максимальный уровень половодья ..... 38

2.3.2 Минимальный уровень летне-осенней межени ..... 42

2.3.3 Максимальный зимний уровень ..... 43

2.4 Ледовый режим ..... 46

2.4.1 Продолжительность ледостава ..... 47

2.4.2 Даты вскрытия и замерзания реки ..... 48

Выводы по главе 2 ..... 50

**ГЛАВА 3 СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕКИ МАЙМА ..... 51**

3.1 Автономный измерительный комплекс «Майма» ..... 52

3.1.1 Технические характеристики автономного измерительного комплекса «Майма» ..... 55

3.2 Сравнительный анализ гидрометеорологических характеристик наблюдений Росгидромета и автономного комплекса «Майма» ..... 58
3.3 Комплексная оценка гидрометеорологических характеристик половодья в 2016, 2017 и 2018 годах ..... 65
3.3.1 Формирование половодья 2016 года ..... 71
3.3.2 Формирование половодья 2017 года ..... 75
3.3.3 Формирование половодья 2018 года ..... 81
3.3.4 Анализ характера половодья в 2016, 2017 и 2018 годах ..... 88
Выводы по главе 3 ..... 94
**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 95**
**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ ..... 97**

# ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В последние десятилетия участились чрезвычайные ситуации (ЧС) гидрологического характера, как в России, так и во всем мире [Smith, 1997; Townsend et al., 1998; Van Der Nat et al., 2002; Kazama et al., 2007; Prigent et al., 2007]. Наводнения представляют собой опасность для населения [Pritchard, 2013; Chanson et al., 2014] и занимают первое место по суммарному среднему годовому ущербу среди всех видов стихийных бедствий [Бузин и др., 2007]. Причины их возникновения связаны как с хозяйственным освоением речных долин, в связи с увеличением населения [Авакян, 2001; Gergel et al., 2002; Онучин, 2007; Syvitski et al., 2009], так и с современными изменениями климата (увеличение осадков, таяние льдов, повышение уровня океана и др.) [Sayama et al., 2012; Кононова, 2014; Сухова и др., 2015; Modrick et al., 2015; Azam et al., 2017]. Именно поэтому исследование факторов формирования наводнений является первоочередной задачей [Авакян, 2001; Botai et al., 2015].

Наибольшее увеличение повторяемости и продолжительности опасных наводнений вследствие современных климатических изменений приходится на территорию горных и предгорных регионов Алтае-Саянской горной системы [Экстремальные…, 2010; Изменение климата…, 2011; Климова и др., 2011; Семенов, 2011; Второй оценочный доклад…, 2014]. Территория Республики Алтай с большим количеством крупных населенных пунктов является одним из наиболее подверженных риску затопления участков бассейна Верхней Оби [Робертус, 2014; Семенов, 2014; Харламова и др., 2015; Галахов и др., 2016; Робертус и др., 2017]. Так, аномально высокий дождевой паводок, прошедший в северной части Республики Алтай 27–31 мая 2014 г. [Главное управление МЧС России, 2014; Научно-практический журнал…, 2014; Новости Горного Алтая, 2014], стал самым катастрофическим событием по интенсивности, масштабам наводнения и величине причиненного ущерба за весь период инструментальных наблюдений в регионе [Робертус и др., 2014; Кононова, 2015].

Методы решения гидрологических и водохозяйственных задач регламентируются рядом нормативных документов. Однако в современных условиях необходимо рассмотрение подходов, которые, развивая идеологию существующих нормативов, позволяют получать более надежные оценки водных ресурсов [Болгов и др., 2013а; Рычков и др., 2015; Новаковский и др., 2015]. В частности, решить некоторые задачи можно путем использования новых подходов [Болгов и др., 2013б; Антонов и др., 2015; Amengual et al., 2015; Ротанова и др., 2016; Болгов и др., 2017]. В условиях общего дефицита гидрометеорологической информации, любые данные о функционировании речных бассейнов – ценный источник информации при решении широкого спектра научных и практических задач [Borga et al., 2000; Toth et al., 2000; Cloke et al., 2009; Li et al., 2009; Martinis et al., 2009; Лубенец и др., 2018а; Silvestro et al., 2019]. В связи с этим в бассейне р. Майма, в низовьях которого расположены столица Республики Алтай, г. Горно-Алтайск и самое большое село России – с. Майма, была установлена система автономного мониторинга состояния окружающей среды, получившая название Автономный комплекс «Майма». Он позволяет, помимо основных гидрометеорологических характеристик, учитывать характеристику почвы для определения ее инфильтрационной способности на момент ЧС, т. к. промерзание и переувлажнение влечет за собой образование водоупора в поверхностном слое почвы [Javelle et al., 2010; Tao et al., 2013; Jeong et al., 2019].

**Объекты исследования**: бассейн реки Майма (Республика Алтай).

**Предмет исследования**: влияние природно-климатических условий на гидрологический режим реки Майма.

**Цель и задачи исследований.** Разработка научной основы для снижения опасности наводнения в бассейне реки Майма на базе выявления факторов его формирования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи** исследования:

1. Проанализировать региональные природные особенности исследуемой территории, и причины возникновения наводнений для постановки научной проблемы;
2. Исследовать особенности внутригодовой и межгодовой динамики гидрометеорологических характеристик и ее влияние на гидрологический режим бассейна реки Майма в условиях современного изменения климата;
3. Исследовать возможность предупреждения критического подъема уровня воды в период весеннего половодья на реке Майма в пределах г. Горно-Алтайска и с. Майма с помощью непрерывного дистанционного мониторинга инфильтрационных свойств почв посредством АК «Майма».

**Научная новизна работы.**

- Впервые определено, что при общем повышении температур воздуха в условиях современного изменения климата наблюдается снижение максимальных зимних уровней воды.
- Впервые показано сокращение продолжительности ледостава, смещение дат вскрытия и замерзания реки Майма, что свидетельствуют о нарастании потепления климата.
- Впервые создана синхронизированная база гидрометеорологических данных за 2015-2018 гг. на основе новых пунктов наблюдений, в которую вошла информация о малоизученном верховье бассейна реки Майма.
- Впервые предложена научная основа для улучшения точности предупреждения наводнения в пределах г. Горно-Алтайска и с. Майма в период половодья посредством данных непрерывного дистанционного мониторинга инфильтрационных свойств почв АК «Майма» и сверхкраткосрочного прогноза жидких осадков Росгидромета.

**Теоретическая и практическая значимость.** С помощью анализа региональных природных особенностей исследуемой территории в многолетнем периоде и экспериментальных исследований гидрометеорологических процессов рассматриваемой реки была создана научная основа для снижения опасности

наводнения за счет выявления факторов его формирования. Полученные результаты могут быть использованы при планировании хозяйственной деятельности и быть полезными административным структурам и МЧС для проведения мероприятий по защите от чрезвычайных ситуаций гидрологического характера на территории не только бассейна реки Майма, а также на большей части всего Алтая. Результаты диссертационной работы внедрены и используются в ФГБОУ ВО Горно-Алтайском государственном университете в научных целях для оценки инфильтрационных свойств почв в бассейне реки Майма, в том числе в период половодья, а также в курсе «Гидрология».

**Исходные данные и методы исследования.**

В работе использовались:

- данные о расходах и уровнях воды наблюдательной сети Росгидромета с 1940–2018 гг. по гидрологическому посту «с. Майма»;
- данные с сервиса ВНИИГМИ-МЦД об ежедневной температуре воздуха и суточном количестве осадков с 1940–2018 гг. на метеостанции в с. Кызыл-Озёк [ВНИИГМИ-МЦД];
- данные о температуре воздуха, количестве осадков, высоте снежного покрова, температуре и влажности почвы, об уровне и температуре воды с автономного измерительного комплекса «Майма» с 2015–2018 гг.

Использовались картографические материалы, литературные источники и электронные ресурсы. Обработка данных и анализ временных рядов проводились в пакетах MS Excel, Origin, STATISTICA 10.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. В период наблюдаемого (с 1976–2016 гг.) повышения температур ноября–декабря снижается зимний уровень воды: корреляционная связь между этими двумя параметрами усиливается, коэффициент отрицательной корреляции возрастает до -0,55 и становится значимым.
2. В условиях современного изменения климата (с 1976–2016 гг.) в бассейне реки Майма продолжительность ледостава уменьшилась в 2,4 раза, а ее

изменчивость по среднеквадратичному отклонению (СКО) увеличилась с 11 до 19 дней, при этом даты замерзания реки сместились на более поздние сроки (СКО с 13 дней до 39), а даты вскрытия – на более ранние (СКО с 8 дней до 32).

3. Осуществляемый с помощью автоматизированного комплекса «Майма» непрерывный дистанционный мониторинг инфильтрационных свойств почв совместно со сверхкраткосрочным прогнозом жидких осадков Росгидромета позволяет заблаговременно предупредить о критическом подъеме уровня воды в пределах г. Горно-Алтайска и с. Майма в период весеннего половодья на основе синхронных гидрометеорологических наблюдений в нескольких точках водосбора.

**Достоверность результатов.** Достоверность и обоснованность полученных выводов диссертационной работы подтверждается:

- статистической обеспеченностью исследуемых временных рядов гидрометеорологических данных наблюдений;
- использованием апробированных статистических методов обработки данных;
- согласованностью результатов с опубликованными исследованиями других авторов;
- сравнением полученных экспериментальных измерений с данными гидрометеорологических наблюдений Росгидромета.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований доложены: на конференции молодых ученых ИМКЭС СО РАН (Томск, 2018, 2019), III Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2017), Двенадцатом Сибирском совещании и школе молодых ученых по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2017), Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» (Иркутск, 2018), Международной конференции и

школе молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: «ENVIROMIS-2018» (Томск, 2018), 22-ой Международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Майкоп, 2018), Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018), II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2018).

**Личное участие автора.** Автором проведен анализ литературных источников, осуществлен поиск и проведена обработка данных с гидрологических и метеорологических ежегодников Росгидромета за 76 лет по исследуемому бассейну. Также в бассейне реки Майма автором организованна и распределена сеть станций сбора характеристик окружающей среды (автономный комплекс «Майма») для получения современных экспериментальных данных, произведена их обработка за 3 года, выполнены основные расчеты. Совместно с соавторами статей, лежащих в основе диссертации, произведен анализ полученных результатов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, также 1 публикация в рецензируемом сборнике международных конференций (IOP Conference Series) и 7 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных конференций, совещаний и школ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и списка использованной литературы. Текст работы изложен на 115 страницах, иллюстрирован 14 таблицами и 42 рисунками. Список

использованной литературы содержит 138 источников, из которых 44 работы на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность за постоянную поддержку, ценные советы, рекомендации и значительный вклад в создание данной работы научному руководителю члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук, профессору Владимиру Владимировичу Зуеву, а также кандидату физико-математических наук Нине Евгеньевне Зуевой, кандидату географических наук Екатерине Михайловне Коротковой и Сергею Анатольевичу Куракову – за передачу бесценного опыта совместной работы.

# ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА РЕКИ МАЙМА

Низкогорные ландшафты занимают более половины площади бассейна Верхней Оби. Здесь формируется большая часть стока первой половины половодья [Галахов и др., 2016]. К тому же, низкогорья наиболее освоены и преобразованы человеком, что не может не отразиться на структурно-функциональной организации ландшафтов [Лубенец и др., 2019а]. Поэтому одним из факторов, влияющих на выбор территории, являлось преимущество низкогорья в речном бассейне реки Майма. В свою очередь бассейн основательно обеспечен метеорологической и гидрологической информацией, что позволяет исследовать его в многолетнем периоде, включая современное изменение климата.

Кроме того, бассейн реки Майма, за исключением небольшой части, находится в пределах одной физико-географической провинции, что уменьшает влияние региональной неоднородности, также для него характерна относительно простая структура высотной поясности и строение долинной подсистемы, что позволяет наглядно проследить связь между атмосферными осадками и стоком [Лубенец и др., 2018б]. Более того высокая залесенность (конкретно для Горного Алтая) влияет на снегонакопление и таяние снежной массы, а значительная антропогенная трансформация позволяет выявить связь между масштабами антропогенного воздействия и стоком [Лубенец и др., 2019б].

Другими словами, выбор данной территории обусловлен тем, что бассейн р. Майма характеризуется относительным единством условий формирования стока с точки зрения геоморфологической и высотно-поясной организации и является перспективным модельным объектом для ландшафтно-гидрологических исследований в условиях дефицита гидрометеорологической информации, репрезентативным для большей части всего Алтая [Золотов, Лубенец и др., 2012].

## 1.1. Географическое положение, геологическое строение и рельеф

Майма – река на севере Республики Алтай, правый приток Катуни, входит в систему Верхней Оби (рисунок 1.1). Протекает на территории одноимённого Майминского района, который относится к Северо-Восточной Алтайской ландшафтной провинции. Река берёт своё начало на хребте Иолго рядом с безымянной вершиной (1144 м), к югу от села Урлуаспак (Урлу-Аспак) на юге Майминского района. Далее Майма проходит в северо-западном направлении через сёла Урлуаспак, Александровка, Бирюля, Кызыл-Озёк, Майма, а также через столицу региона – Горно-Алтайск, впадая в реку Катунь [Атлас, 1978].

Длина реки составляет 57 км, превышение истока над устьем 800 м, средний уклон 1,4 %, средняя отметка водосбора 670 м. Площадь водосборного бассейна – 780 км². Ледники и озера отсутствуют. [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969]. Располагается водосборный бассейн на 86° с.ш. и 52° в.д., в пределах Северной Алтайской (69,6 %) и Северо-Восточной Алтайской (30,4 %) физико-географических провинций Алтайской горной области, приурочен к низко-среднегорной умеренно увлажненной и залесенной зоне Северного Алтая. Большая часть ландшафтов относится к подклассу низкогорных, тогда как горно-долинные и среднегорные ландшафты вместе занимают 10,5 %. [Атлас, 1978; Черных и др., 2011]. Верхняя часть бассейна занимает среднегорный, а нижняя – низкогорный районы. До впадения основного притока (р. Сайдыс) территория бассейна расчленена хребтами, высоты которых могут достигать более 1000 м. Крутизна склонов составляет 6–12° в окрестностях г. Горно-Алтайска, 12–20° – в верховьях бассейна. В нижнем течении река течет по сглаженной низкогорной поверхности и имеет крутизну склонов 3–6°. Склоны долины р. Майма и ее притоков в окрестностях агломерации Майма – Горно-Алтайск – Кызыл-Озёк относятся к оползнеопасным районам. В целом территория района довольно освоена и в большом количестве встречаются антропогенные формы рельефа: дорожные насыпи, карьеры и др. [Природные комплексы…, 2006].

Рисунок 1.1 – Фрагмент физико-географической карты Республики Алтай с расположением реки Майма [Республика Алтай: Атлас, 2008]

Водосборный бассейн р. Майма полностью находится в переделах Катунской структурно-формационной зоны, сложенной терригенно-карбонатными породами верхнего рифея – нижнего кембрия, структурно ориентированными в субмеридиональном направлении. Перекрывающий их чехол современных пролювиально-делювиальных и аллювиальных отложений (суглинки, пески, галечники и др.) имеет мощность от первых метров до первых десятков метров [Пузанов и др., 2015].

Географическое положение Майминского района, характер его рельефа, отдаленность от океанов и морей отражается на ландшафте, гидрографии, характере климата, почвах и растительности, и поэтому требует детального рассмотрения каждого природного компонента района. [Природные комплексы…, 2006].

## 1.2. Климатические условия

Климат региона резко континентальный. В низовьях бассейна р. Майма расположена длительно функционирующая метеостанция в с. Кызыл-Озёк. Наблюдения на ней ведутся с 1929 года. По ее данным средняя годовая температура воздуха составляет +1 °С. Годовая сумма осадков – 795 мм, со средней их изменчивостью около 20 %. Коэффициент увлажнения на территории района меняется от 0,7 до 1,3 [Природные комплексы…, 2006], годовая величина испаряемости – 533,5 мм, период со средней суточной температурой ниже 0 °С – 170 дней [Модина и др., 2007; ВНИИГМИ-МЦД].

Исследуемый бассейн отличается теплым и влажным летом, снежными и сравнительно мягкими зимами. Средние многолетние температуры в июле не опускаются ниже 15 °С. Максимальные температуры воздуха могут достигать 36–38 °С, большие значения абсолютных максимумов достигаются в весенние и осенние месяцы [Севастьянов, 1998; Золотов, Николаева и др., 2012].

Осенью переход средней суточной температуры через 0 °С происходит с 20 по 30 сентября. В долине Маймы зима начинается после перехода средней суточной температуры через –5 °С, обычно это середина первой декады ноября. После 20 ноября и в середине декады средняя суточная температура опускается до –10 °С. Период с температурой ниже –15 °С продолжается с конца декабря до середины февраля. Средняя температура января в Кызыл-Озёке –15,9 °С, средний минимум –21,9 °С, абсолютный минимум –44 °С, средний максимум –8 °С, абсолютный максимум +11 °С (таблица 1.1) [Природные комплексы…, 2006].

В холодный период года атмосферные осадки выпадают в твердом виде, т.е. в виде снега. Первые снегопады иногда наблюдаются в конце сентября, но обычно

в середине октября. И только через 2–3 недели после первых снегопадов образуется устойчивый снежный покров. Чаще всего это происходит в начале ноября. В предгорной части долины Катуни и в пределах всей долины Маймы устойчивость снежного покрова не нарушается в течение всей зимы. Средняя высота снежного покрова за зиму на открытых местах 30–40 см, в защищенных местах 50–60 см. Среднее число дней со снежным покровом 150-160. Запасы воды в снеге – 140–150 мм. [Природные комплексы…, 2006]. Сход снежного покрова происходит в третьей декаде марта, реже – в первой декаде апреля [Лубенец и др., 2016; ВНИИГМИ-МЦД].

Таблица 1.1 – Средняя месячная и средняя годовая температура (°С) на ГМС Кызыл-Озёк

| ГМС | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кызыл-Озёк | -15,9 | -15,1 | -9,1 | 1,0 | 10,5 | 15,9 | 18,0 | 15,7 | 9,8 | 2,4 | -7,7 | -13,5 | 1,0 |
| | Средний минимум | | | | | | | | | | | | |
| | -21,9 | -21,2 | -15,8 | -4,8 | 3,4 | 8,3 | 11,4 | 9,6 | 4,0 | -2,6 | 12,7 | -19,8 | -5,1 |
| | Средний максимум | | | | | | | | | | | | |
| | -8,0 | -7,5 | -1,7 | 8,2 | 18,0 | 23,2 | 25,1 | 22,9 | 17,3 | 9,8 | -1,2 | -7,5 | 8,2 |

Согласно О. П. Николаевой с соавт. [2015], распределение средних многолетних температур воздуха и осадков и их соотношения в исследуемом бассейне с учетом вертикального и горизонтального градиентов отражают следующие закономерности:

- холодный период характеризуется температурными инверсиями (с высотой температура воздуха повышается); по суммарному количеству выпадающих осадков территория разделилась на две части: западную и более увлажненную восточную;

- среднее годовое распределение температуры и осадков, а также коэффициента увлажнения согласуется с общим направлением увлажнения Северной Алтайской и Северо-Восточной Алтайской провинций.

- по степени увлажнения бассейн р. Майма относится к зоне с гумидным и экстрагумидным климатами.

## 1.3. Гидрологическая характеристика бассейна

Река Майма – правый приток первого порядка р. Катунь (Верхняя Обь). Является гидрологическим районом с густой сетью малых рек ее системы с постоянным стоком и преобладающим снего-дождевым питанием при доле грунтового питания около 20 % [Пузанов и др., 2015]. Коэффициент извилистости р. Майма колеблется около 1,2 [Природные комплексы…, 2006].

В бассейне реки имеется водомерный пост, находящийся в замыкающем створе с. Майма, примерно в 2 км от впадения реки в Катунь. Наблюдения на нем ведутся с 1939 года по настоящее время [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969]. Согласно гидрологическим ежегодникам, средний годовой расход реки за весь период наблюдений – 8,47 $м^3/с$ (максимальный 285 $м^3/с$). Слой стока 356 мм, модуль стока 11,3 $л/(с·км^2)$ [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969]. Средний многолетний уровень во время половодья 3,4 м, максимальный 5,5 м над нулем гидропоста в устье реки. Скорость течения варьируется от 1 до 3 м/с. По типу водного режима р. Майма относится к рекам с весенним половодьем и летними паводками. Около 45 % стока приходится на весну, 30 % на лето. Мутность воды варьируется в пределах 60–270 $г/м^3$, средний сток взвешенных веществ 1–1,5 кг/с, средний годовой модуль твердого стока 40–50 $т/км^2$ [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969; Пузанов и др., 2015]. Средняя продолжительность ледостава – 140 дней, толщина льда от 80 до 100 см, наблюдаются полыньи, в последние десятилетия в теплые зимы река вовсе может не покрываться льдом.

Сроки начала половодья могут значительно колебаться, средняя его продолжительность – 70 дней. Во время половодья ход стока определяется, в основном, таянием накопленных за зиму твердых осадков [Ельчининова и др., 2017]. В летний период отмечаются значительные дождевые паводки. Суммарный весенне-летний сток может составлять 80 % годового. После прохождения половодья на реке устанавливается межень, которая в осенний период также может нарушаться дождевыми осадками. В зимний период сток реки поддерживается за счет поступления подземных вод [Природные

комплексы…, 2006] и за счет незначительных оттепелей. То есть, основными источниками питания являются твердые атмосферные осадки, подземные воды и дождевые осадки [Ельчининова и др., 2017].

Рисунок 1.2 – Средний многолетний гидрограф стока и средний многолетний уровень воды р. Майма с 1940–2016 г. по гидропосту с. Майма

На Рисунке 1.2 приведены средний многолетний гидрограф стока и график колебания среднего многолетнего уровня воды по данным гидрологических ежегодников за период с 1940 по 2018 гг. с водомерного поста в с. Майма. Видно, что в зимнее время уровень воды имеет тенденцию к повышению, что говорит о шугообразовании, которое характерно для типичных горных рек.

В целом, гидрологический режим характеризуется низкой зимней меженью, значительным весенним половодьем, довольно частыми и в некоторых случаях сопоставимыми с половодьем дождевыми паводками [Галахов, 2015], которые в свою очередь могут приводить к наводнениям (рисунок 1.3). По характеру водного режима река в нижней части является переходной от типично горных рек

к предгорному гидрологическому типу с сезонной динамикой водного стока [Пузанов и др., 2015].

Рисунок 1.3 – Наводнение на р. Майма в мае 2014 года: затопленная улица г. Горно-Алтайска (Фото: Анна Ковшарь [Живой журнал, 2014])

## 1.4. Характеристика почвенно-растительного покрова

Водосборный бассейн р. Майма представлен преимущественно горно-лесными темно-серыми почвами под смешенными березово-пихтовыми лесами [Пузанов и др., 2014а]. Стоит отметить что водопропускная и водоудерживающая способность таких видов почв достаточно высока, по сравнению, например, со степными видами почв Алтая – из-за повышенного содержания гумуса, меньшего содержания водорастворимых солей, лучшей структурированности и более высокой порозности в горно-лесной легкоглинной почве влаги удерживается больше, чем при тех же значениях давления в более легком по гранулометрическому составу, но более плотном черноземе обыкновенном суглинистом [Пузанов и др., 2014б]. Однако, согласно Лубенец и др. [2015],

территория бассейна в целом избыточно увлажнена и имеет низкие значения влагоемкости почвогрунтов. Также особенностью рассматриваемой территории является преобладание транзитных местоположений, что в условиях избыточного увлажнения создает риски опасных гидрологических процессов [Лубенец и др. 2015].

В низовьях реки Майма и долине реки Катунь (вблизи с. Майма) распространены преимущественно травянистые березовые леса в комплексе с суходольными лугами, а по пологим склонам – с участками пашни. Эти леса приурочены преимущественно к выщелоченным или оподзоленным черноземам и темно-серыми почвами [Природные комплексы…, 2006].

Растительный покров района довольно разнообразен. Его распределение, как и на любой горной территории, определяется законами вертикальной поясности, а также экспозицией и крутизной склонов. По мере увеличения абсолютных высот в горах Алтая происходит смена трех вертикальных поясов растительности: степного, лесного и высокогорного [Природные комплексы…, 2006].

Для бассейна р. Майма, как и Русского Алтая в целом, характерно преобладание лесного пояса (почти 95 % общей площади): чернево-таёжные субнеморальные (247,66 км$^2$ – 31,9 % общей площади) и подтаёжные (480,89 км$^2$ – 62 %). Лесостепные барьерно-циклонические ландшафты занимают в пределах бассейна незначительную площадь (47,48 км$^2$ – 6,1 %) [Черных и др., 2011; Лубенец и др., 2019а]. Нижняя граница леса начинается на высоте 270–400 м над ур. м. Главными лесообразующими породами являются пихта сибирская (*Abies sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), сосна сибирская (*Pinus sibirica*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*). Из лиственных пород характерно широкое распространение березы повислой (*Betula pendula*) и осины (*Populus tremula*), редко тополя (*Populus laurifolia* и *Populus nigra*) [Природные комплексы…, 2006].

Флора и растительность района сформировались в неоднородных природных условиях при непосредственном и тесном взаимодействии всех их

звеньев и под длительным влиянием антропогенной нагрузки. Уже сегодня около 30 видов растений внесено в Красную книгу Республики Алтай [Природные комплексы…, 2006].

## 1.5. Характеристика антропогенной нагрузки

Несмотря на небольшую протяженность реки, её бассейн является самым антропогенно-нагруженным на Алтае, так как р. Майма протекает по единственному городу региона – Горно-Алтайску и районному центру – с. Майма – самому крупному селу России. Долина реки находится на территории активного хозяйственного освоения, в первую очередь, в пределах агломерации Кызыл-Озёк – Горно-Алтайск – Майма. Но большая часть бассейна (водосборные площади притоков) располагается на территориях, занятых лесом [Природные комплексы…, 2006]. Также из-за наличия крупнейшей агломерации антропогенный фактор является важной составляющей формирования ландшафта территории. Кроме того в пределах бассейна развита сельскохозяйственная деятельность. В настоявшее время преобладают пастбищные и сенокосные угодья [Лубенец и др., 2017а].

Согласно А. В. Пузанову с соавт. [2015], максимум антропогенной нагрузки на р. Майма приходится на агломерацию г. Горно-Алтайска. Степень антропогенной трансформации речных вод в целом низкая и выражается в слабом увеличении содержания сульфатов, хлоридов, фосфатов, тяжелых металлов и более значительном увеличении азотистых соединений, ХПК (показатель химического потребления кислорода) и БПК (показатель биохимического потребления кислорода). Наибольшая степень антропогенной трансформации химического состава воды р. Майма при сохранении ее природного гидрохимического типа проявлена на участке сброса стоков очистных сооружений республиканского центра.

Так, высокая степень загрязнения грунтовых вод в районе с. Майма и с. Кызыл-Озёк объясняется слабо развитой сетью коммунально-бытовых услуг (менее 30 % сельского населения пользуются водопроводом и ещё меньше –

канализацией). Основная часть жителей (более 2 тыс. усадеб) при каждом доме имеют стоки туалета, бань, выгребных ям, бытового мусора, золоотвалы, плюс практически ежегодное использование сельскохозяйственных удобрений (навоз, куриный помет). Все перечисленные выше хозяйственно-бытовые стоки дренируются в грунтовые и поверхностные воды и в естественной обстановке не успевают самоочищаться [Природные комплексы…, 2006].

Экологическое состояние воды р. Майма в последние годы несколько улучшилось из-за прекращения деятельности большинства промышленных предприятий в районе г. Горно-Алтайска и перевода основной части котельных на природный газ. В настоящее время оно отвечает малоблагоприятному уровню загрязненных вод, пригодных для использования без очистки для хозяйственно-бытовых и технических нужд [Пузанов и др., 2015].

## Выводы по главе 1

1) Низкогорья наиболее освоены и преобразованы человеком и при этом занимают более половины площади бассейна Верхней Оби. За исключением небольшой части, бассейн реки Майма находится в пределах одной физико-географической провинции. Ключевыми факторами выбора территории для исследований являлись преимущество низкогорья в речном бассейне реки Майма, характерная для него относительно простая структура высотной поясности и строение долинной подсистемы.

2) В условиях дефицита гидрометеорологической информации, бассейн реки Майма основательно обеспечен метеорологической и гидрологической информацией для исследований в многолетнем периоде – имеет длительно функционирующую метеостанцию и гидрологический пост, несмотря на небольшую площадь водосборного бассейна – 780 км².

# ГЛАВА 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ МАЙМА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Алгоритм ландшафтно-гидрологических исследований в условиях дефицита гидрометеорологической информации должен опираться на анализ климато-гидрологического фона [Золотов, Лубенец и др., 2012].

Результаты современных исследований изменения климата, включая Западную Сибирь, обобщены и представлены в [Задде и др., 2000; Касимов и др., 2012; Climate changes in Siberia, 2013; Второй оценочный…, 2014; Ипполитов и др., 2015; Решетько и др., 2016]. Далее рассматривается река Майма в аналогичных климатических условиях.

## 2.1. Температура воздуха и осадки

Современные изменения климата выражаются в росте глобальной температуры воздуха и региональном перераспределении количества осадков. Являясь продуктом климата, реки отвечают на изменение метеорологических параметров изменениями в гидрологическом режиме [Изменение климата…, 2011]. Так, под воздействием климатических изменений в последние десятилетия в большинстве регионов России на реках отмечаются изменения сезонного и годового стока, увеличение повторяемости чрезвычайных ситуаций гидрологического характера, в числе которых экстремальные летние маловодья, катастрофические паводки и наводнения в период весеннего половодья [Экстремальные гидрологические…, 2010; Изменение климата…, 2011; Второй оценочный доклад…, 2014; Zuev et al., 2018].

К концу 1990-х годов систематическое и неравномерное повышение температуры воздуха во всех регионах Сибири отличалось более высоким трендом, чем в целом по планете, а для территории Горного Алтая наибольшее потепление наблюдалось в зимний и весенний сезоны [Ипполитов и др., 2003; Сухова и др., 2007]. С начала 2000-х годов отмечается замедление роста средней годовой температуры воздуха, в Сибири этот процесс происходит за счет

образования очагов похолодания в зимний период [Ипполитов и др., 2014]. Начиная с 2010 года, область зимнего похолодания проявляется на юге Западной Сибири, охватывая алтайский регион [Второй оценочный доклад…, 2014].

Началом периода современного изменения климата принято считать 1976 год, с которого наблюдается наиболее интенсивный рост температуры воздуха, в том числе в алтайском регионе [Семенов и др., 2012; Харламова, 2013]. В литературных источниках отмечается, что для территории Горного Алтая в целом характерно синхронное во всех высотных поясах повышение годовой температуры воздуха [Аванесян и др., 2011], уменьшение осадков в зимний период, увеличение в летний и рост их пространственной неоднородности [Шмакин и др., 2012; География Сибири…, 2016]. Учащение поздних и ранних заморозков, расширение диапазона максимальных и минимальных температур, а также увеличение засушливости свидетельствуют о нарастании экстремальности климата [География Сибири…, 2016].

Таблица 2.1 – Средние многолетние значения температуры воздуха и количества осадков и их коэффициенты линейного тренда

| | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Год |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура, °С | -14,7 | -13,7 | -6,8 | 3,5 | 11,5 | 16,6 | 18,6 | 16,2 | 10,3 | 3,2 | -6,5 | -12,4 | 2,1 |
| Коэффициент линейного тренда, °С/10 лет | 0,18 | **0,57** | **0,66** | **0,48** | 0,14 | 0,10 | **0,12** | **0,17** | **0,14** | **0,18** | **0,52** | **0,45** | **0,31** |
| Осадки, мм | 24 | 24 | 32 | 57 | 80 | 99 | 111 | 100 | 73 | 65 | 51 | 38 | 755 |
| Коэффициент линейного тренда, мм/10 лет | -0,68 | -0,21 | -1,21 | 1,6 | 2,15 | -3,14 | 0,47 | -1,34 | -0,11 | -1,78 | -2,37 | -2,22 | -0,74 |

*Коэффициенты линейных трендов, достоверных при уровне значимости 0,05, выделены жирным шрифтом

Для исследования были взяты данные наблюдений за температурой воздуха и осадками по метеостанции в с. Кызыл-Озёк с 1940 по 2016 годы [ВНИИГМИ-МЦД]. В соответствии с имеющимися данными выявлено, что средняя

многолетняя температура воздуха за период наблюдений составила +2,1 °С (таблица 2.1). Минимальные температуры наблюдаются в январе, максимальные в июле. За рассматриваемый период величины линейных трендов во все месяцы являются положительными и практически во все месяцы значимыми. Максимальные скорости повышения температуры (коэффициенты линейного тренда до 0,66 °С/10 лет) характерны для холодного сезона за исключением января, а также для апреля. Наибольшее количество осадков регистрируется с июня по август, наименьшее – в январе и феврале (таблица 2.1). Значимых трендов в распределении осадков в отдельные месяцы за период наблюдений 1940–2016 гг. не наблюдается. При рассмотрении сумм осадков за теплый (апрель–октябрь) и холодный (ноябрь–март) периоды выявлено, что достоверное снижение количества осадков наблюдается только в холодный период, коэффициент линейного тренда составляет 6,9 мм/10 лет. На протяжении 76 лет наблюдений динамика годового количества осадков определялась преимущественно осадками теплого периода (77,6%) [Zuev et al., 2018].

Для анализа сезонной и годовой динамики температуры воздуха и осадков были рассмотрены их аномалии относительно климатической нормы 1961–1990 гг., рекомендованной Всемирной метеорологической организацией. Видно, что для рядов температуры воздуха устойчивый переход 11-тилетнего скользящего среднего (цикл солнечной активности) через ноль наблюдается с 1976 года (рисунок 2.1), что согласуется с началом периода современного изменения климата. В период с 1976 по 2016 год отрицательные средние годовые температурные аномалии наблюдаются в середине 1980-х и конце 2000-х/начале 2010-х годов и обусловлены падением температур как теплого, так и холодного периодов. Суммарные осадки, как за год, так и по сезонам в среднем ниже климатической нормы 1961–1990 гг. (рисунок 2.2) [Zuev et al., 2018].

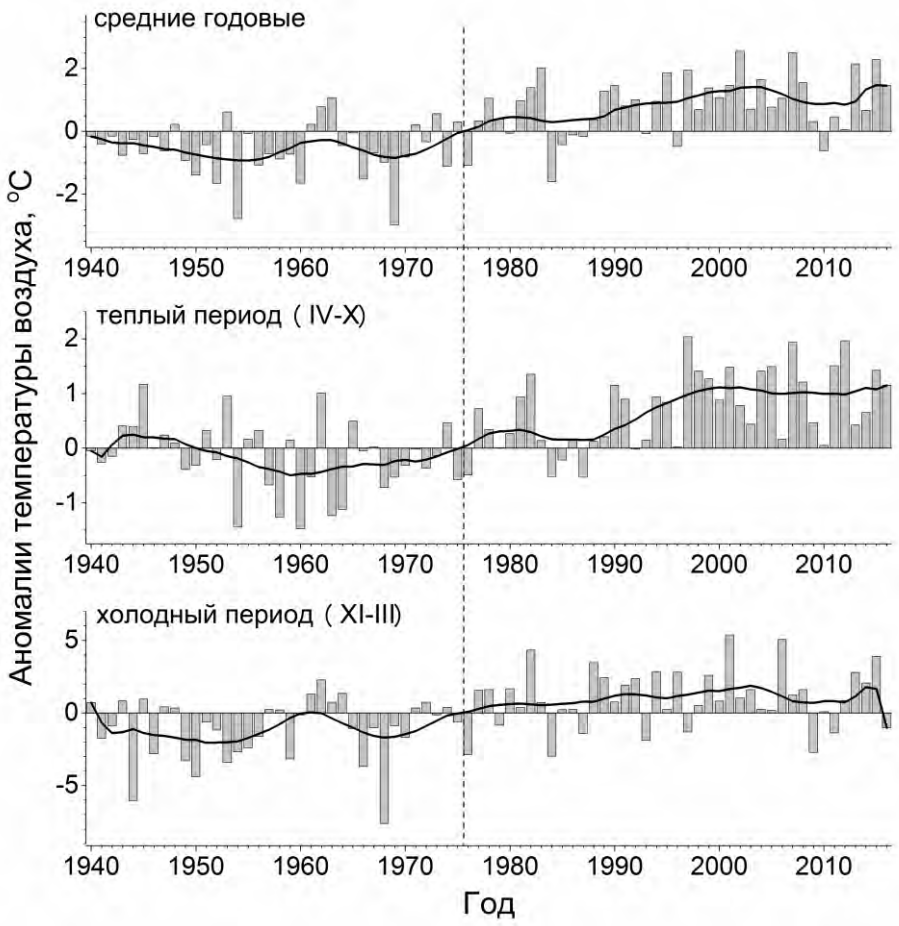



Рисунок 2.1 – Годовые и сезонные аномалии средней температуры воздуха относительно климатической нормы 1961–1990 гг., сглаженные 11-тилетним скользящим средним

Повышение температуры воздуха в холодный период может быть результатом не только общего потепления, но и наблюдающегося на юге Западной Сибири увеличения числа дней с оттепелями [Мирвис и др., 2007; Шикломанов и др., 2009]. Наряду с потеплением холодного периода для территории Алтайских гор характерна тенденция к уменьшению продолжительности устойчивого морозного периода [Мирвис и др., 2007], что может отражаться на датах вскрытия и замерзания рек. Климатическая норма 1961–1990 гг. захватывает как часть фонового периода 1940–1975, так и часть периода современного изменения климата с 1976 года, поэтому тенденции изменения метеопараметров относительно климатической нормы могут быть менее выраженными, чем относительно фонового периода. Повышение температуры воздуха в период 1976–2016 гг. относительно климатической нормы

в среднем за год составляет 0,8 °С, в теплый период 0,7 °С, в холодный период 1 °С, относительно фонового периода – 1,4 °С, 0,9 °С и 2,2 °С соответственно. Суммы осадков относительно климатической нормы за год снизились на 19,1 мм, в теплый период на 4,9 мм, в холодный – на 10,9 мм, относительно фонового периода – на 37,2 мм, 6,2 мм и 32,2 мм соответственно [Zuev et al., 2018].

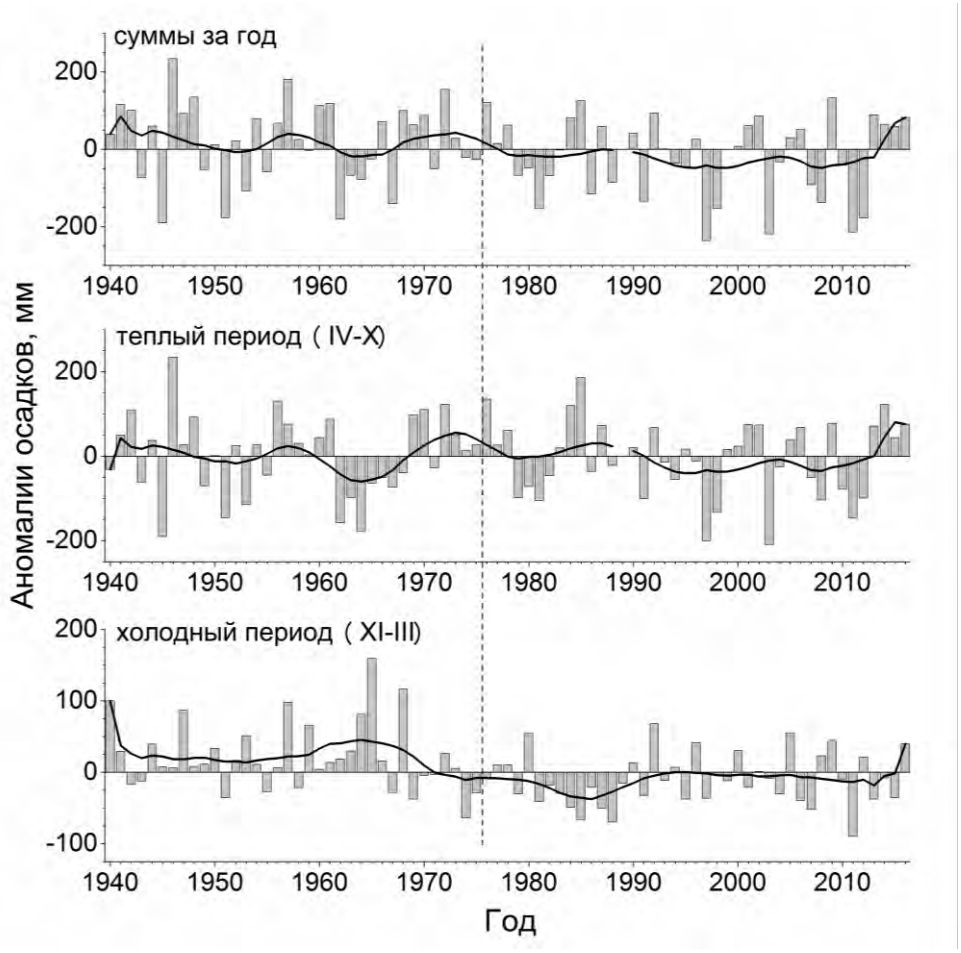



Рисунок 2.2 – Годовые и сезонные аномалии суммарных осадков относительно климатической нормы 1961–1990 гг., сглаженные 11-тилетним скользящим средним

## 2.2. Водный режим

Водный режим рек – закономерные изменения стока воды, скорости течения, уровней воды и уклонов водной поверхности во времени и в пространстве. Зависит от комплекса физико-географических факторов, среди которых главную роль играют метеорологические и климатические факторы. Они

являются самыми непостоянными – имеют целую гамму разнопериодных изменений, которые приводят к проявлению колебаний различной длительности в водном режиме рек, т.е. к колебаниям водности реки. Водность реки – количество воды, переносимое рекой за какой-либо интервал времени (месяц, сезон, год и т.д.) в сравнении со средней многолетней величиной стока воды этой реки и со стоком в другие годы. Анализ водности нужен для оценки изменений стока реки [Михайлов и др., 2007], а размер бассейна и его рельеф – то, что нужно учитывать, исследуя пространственно-временные колебания стока [Сомов, 1963]. Преобладающая часть бассейна Маймы – это горная территория, на которой создается сложная картина перераспределения физико-географических показателей, оказывающих влияние на режим реки и бассейн в целом. Они обусловлены климатическими условиями физико-географических зон и местных факторов. Для правильной оценки изменения водности рекомендуется проводить комплексные расчеты по нескольким способам для получения более точных результатов. Для характеристики водности были использованы графические способы, состоящие из графика временного хода годового стока, нормированной разностной интегральной кривой (НРИК) и осреднения рядов наблюдений по 10-тилетнему скользящему среднему, которое было выбрано для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций и циклов (рисунок 2.3) [Горошко, 2010].

Полученные средние многолетние расходы воды за весь исследуемый период колеблются с большим разбросом – от 2,32 до 12,82 м$^3$/с. Средний годовой расход воды равен 8,46 м$^3$/с, близок к цифре, упомянутой в работе А. В. Пузанова с соавт. [2015] (8,66 м$^3$/с). Наибольшие средние годовые расходы наблюдались в 1958 (14,65 м$^3$/с), 1969 (12,82 м$^3$/с) и в 1984 гг. (12,21 м$^3$/с). Наименьшие – в 1996 (2,32 м$^3$/с), 1998 (4,33 м$^3$/с) и в 2008 гг. (5,05 м$^3$/с). Цифры говорят о сильной многолетней изменчивости годового стока реки. Максимальные расходы воды превышают минимальные почти в 6,5 раз, что говорит о плохой многолетней естественной зарегулированности стока реки. Это, в свою очередь, представляет собой опасность в виде паводков и наводнений.

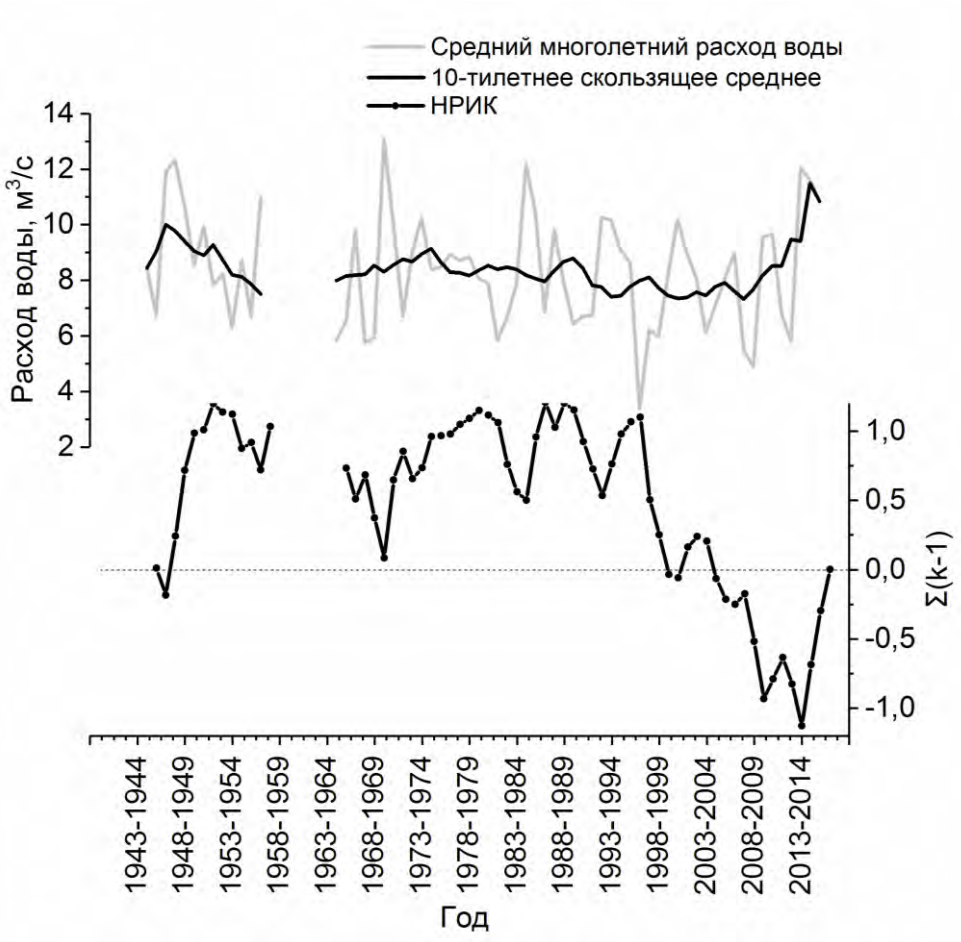



Рисунок 2.3 – Хронологические графики годовых и осредненных по скользящему 10–летнему среднему многолетних расходов воды с нормированной разностной интегральной кривой (р. Майма – с. Майма)

Визуально реальную динамику по графику колебаний годовых значений стока сложно проанализировать: из-за мелких подъемов и спадов средних многолетних расходов воды практически невозможно выделить фазы понижения и повышения водности реки. Кусочно-линейные тренды не дают четких границ окончания и начала фаз, поэтому было принято использовать скользящее среднее по n-летиям, которое позволило сгладить резкие колебания и частично определить границы. Способом подбора было выделено 10-летнее скользящее среднее, которое улучшило визуальное восприятие тенденций и циклов. Однако, при его использовании возможно смещение циклических колебаний, со сдвигом на одну фазу. Для детальных особенностей изменения стока и определения четких границ между фазами была построена НРИК. Маловодную и многоводную фазу будут

определять участки интегральной кривой с соответствующим уклоном вниз или вверх.

Из нормированной разностной интегральной кривой средних многолетних годовых расходов воды р. Майма (рисунок 2.3) в многолетних изменениях стока, визуально можно выделить несколько периодов: подъем стока с начала 1940-х до 1950-х гг., далее – спад до конца 1960-х гг. (с отсутствием данных с 1957–1963 гг.), после – подъем до конца 1970-х гг., плавное колебание до 1981 г., резкие скачки до 1996 г., после – значительный спад годового стока с повышением стока в последние 3 года наблюдений.

Таблица 2.2 – Многолетняя изменчивость годовых расходов воды р. Майма – гидропост с. Майма

| Цикл водности | Период водности | Средний расход воды, $м^3/с$ |
|---|---|---|
| 1945-1956 (12 лет) | 1945-1950 ↑ (6 лет) | 9,8 |
| | 1951-1956 ↓ (6 лет) | 7,6 |
| 1957-1968 (12 лет) | 1958-1964 нет данных | - |
| | 1964-1968 ↓ (5 лет) | 7,0 |
| 1969-1983 (15 лет) | 1969-1978 ↑ (10 лет) | 9,3 |
| | 1979-1983 ↓ (5 лет) | 7,1 |
| 1984-1991 (8 лет) | 1984-1987 ↑ (4 года) | 9,8 |
| | 1988-1991 ↓ (4 года) | 7,0 |
| 1992-1999 (8 лет) | 1992-1995 ↑ (4 года) | 9,8 |
| | 1996-1999 ↓ (4 года) | 5,2 |
| 2000-2012 (13 лет) | 2000-2002 ↑ (3 года) | 9,6 |
| | 2003-2012 ↓ (10 лет) | 7,5 |
| 2013-… | 2013-2016 ↑ (3 года) | 11,5 |
| | нет данных | нет данных |

В многолетних колебаниях средних годовых расходов за 1940–2016 гг. выделены 6 полных циклов продолжительностью 8–15 лет (в среднем 11,5 лет), включающих периоды повышения и понижения водности со средней продолжительностью 5 и 6 лет соответственно (таблица 2.2). Самый длительный цикл отмечен с 1969–1983 гг. (15 лет). Наиболее короткие циклы – 1984–1991 гг. и 1992–1999 гг. (8 лет). Самый большой средний многолетний расход воды (11,5 $м^3/с$) зафиксирован в маловодную фазу, с повышением водности с 2013 г. Вероятно, это связано с тем, что в мае 2014 г. наблюдался экстремальный подъем

уровня воды, вызванный выпадением обильных ливневых осадков в период снеготаяния, что и привело к таким значениям расходов воды в период маловодной фазы.

На основе анализа водности можно прийти к заключению об отсутствии какой-либо строгой периодичности в колебаниях годового стока. Данная асинхронность объясняется размером речного бассейна р. Майма и его физико-географическими и климатическими условиями, которые определяют общие характеристики колебаний стока.

Также важна оценка многолетнего изменения годового и сезонного стока в бассейне реки. Для анализа климатически обусловленных изменений сезонного и годового стока р. Майма использовались данные с гидрологических ежегодников бассейна Карского моря (западная часть) составленные на основе наблюдений сети станций и постов Росгидромета. Период наблюдений с 1940 г. по 2016 г. по единственному, на данной территории, гидрологическому посту, расположенному в с. Майма. Данные о средней месячной температуре воздуха на метеостанции в с. Кызыл-Озёк были получены с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД]. Анализ изменчивости климатических характеристик проводился за теплый (апрель–октябрь) и холодный (ноябрь–март) периоды. Анализ изменчивости стока осуществлялся за гидрологический год (апрель–март) с разделением на гидрологические сезоны: половодье – апрель–июнь, летне-осенняя межень – июль–октябрь, зимняя межень – ноябрь–март. Расчеты коэффициентов корреляции приведены для уровня значимости 0,05. Линейные тренды были выбраны для необходимости определения тенденций роста или падения временных рядов.

### 2.2.1. Многолетние изменения годового и сезонного стока

На фоне повышения температуры воздуха и снижения количества осадков наблюдаются изменения годового (рисунок 2.4) и сезонного стока р. Майма (рисунки 2.5, 2.6, 2.7). Так, динамика изменений среднего годового расхода воды за весь период наблюдений, хотя и не имеет значимого тренда, характеризуется

тенденцией к уменьшению (рисунок 2.4). Значимая корреляционная связь среднего годового расхода воды со средней годовой температурой воздуха отмечается с 1976 года (r = –0,33), а с температурой теплого периода с 1976 года связь усиливается (r = –0,42) (таблица 2.3). Коэффициенты корреляции среднего годового расхода воды, как с суммарными осадками (r = 0,62/0,60(1940–1975/1976–2016 гг.)), так и с осадками теплого периода (r = 0,71/0,68) до и после 1976 года близки по величине. С температурой воздуха и с суммарными осадками холодного периода – значимой корреляционной связи не наблюдается, как до, так и после наступления периода современного изменения климата [Зуев и др., 2019].

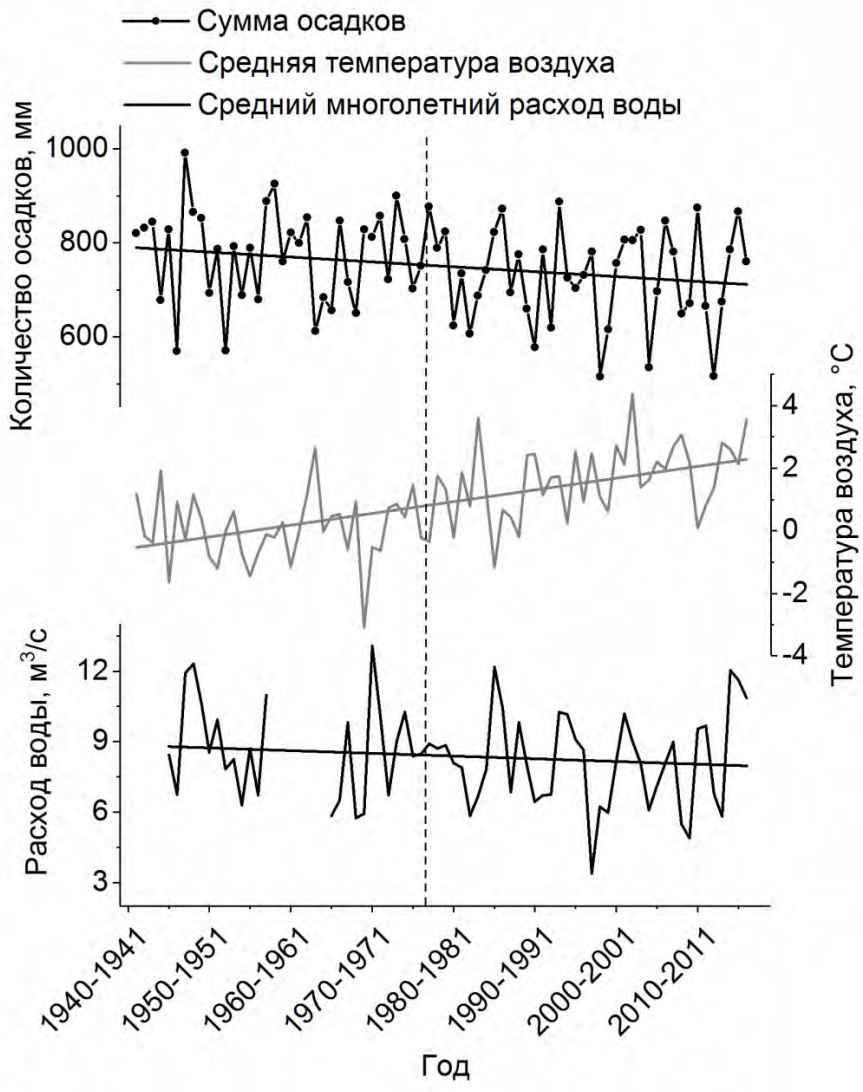



Рисунок 2.4 – Динамика изменения метеопараметров и средних расходов воды р. Майма за гидрологический год

*Половодье.* Значимый отрицательный тренд обнаруживается в динамике средних расходов воды в половодье (рисунок 2.5). Подавляющая часть объема половодья р. Майма формируется за счет таяния снега на водосборе [Галахов, 2015]. Снижение количества осадков холодного периода, наблюдаемое с 1976 года приводит к меньшему стоку талых вод в реку, однако, на объеме половодья может сказываться и температурный фактор. Повышение температуры воздуха в холодный период года способствует сокращению глубины промерзания почвы и ранней водоотдаче из снежного покрова. Это приводит к пополнению запасов грунтовых вод, расходующихся на формирование зимнего стока, в результате чего к началу весеннего снеготаяния влагозапасы снежного покрова уменьшаются. Таким образом, потепление зим наряду с уменьшением количества осадков холодного периода создает условия для снижения стока половодья. Несмотря на этот факт, значимой корреляционной связи между средним расходом воды в половодье и температурой воздуха холодного периода не обнаружено, а коэффициенты корреляции расхода воды с зимними осадками в 1940–1975 и 1976–2016 гг. близки по величине (r = 0,41 и 0,46 соответственно) (таблица 2.3) [Зуев и др., 2019].

Таблица 2.3 – Коэффициенты корреляции средних расходов воды и метеопараметров (1940–1975/1976–2016 гг.)

| Средний расход воды, $м^3/с$ | N | Средняя годовая температура, °С | Сумма осадков за год, мм | Температура холодного периода, °С | Осадки холодного периода, мм | Температура теплого периода, °С | Осадки теплого периода, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Год | 25/40 | -0,22/**-0,33** | **0,62/0,6** | -0,15/-0,08 | 0,25/0,25 | **-0,33/-0,42** | **0,71/0,68** |
| Половодье | 30/40 | - | - | -0,22/0,05 | **0,41/0,46** | - | - |
| Летне-осенняя межень | 30/40 | - | - | - | - | -0,3/**-0,53** | **0,9/0,74** |
| Зимняя межень | 25/40 | - | - | 0,07/0,26 | 0,15/**0,37** | - | - |

*Значения коэффициентов, достоверных при уровне значимости 0,05, выделены жирным шрифтом, N – количество лет, взятое для расчета коэффициентов корреляции, "–" – коэффициенты корреляции не рассчитывались.

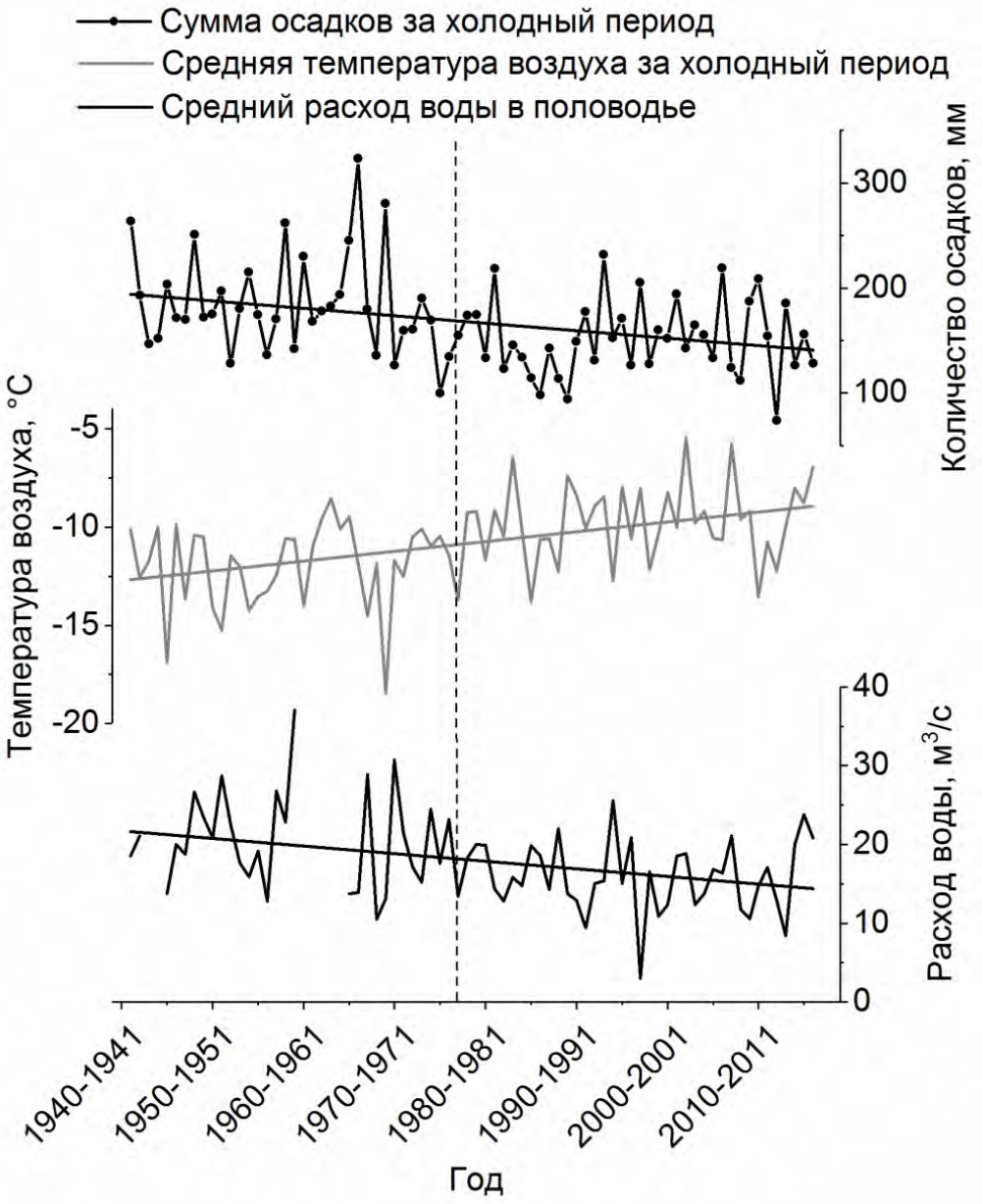



Рисунок 2.5 – Динамика изменения метеопараметров и средних расходов воды р. Майма за половодье

*Летне-осенняя межень.* Изменения стока летне-осенней межени за весь период наблюдений характеризуются близким к нулю трендом и высокой корреляционной связью с количеством осадков теплого периода (r = 0,9/0,74) (рисунок 2.6, таблица 2.3). При этом важно отметить, что при отсутствии значимых изменений стока, с 1976 года вклад температуры воздуха теплого периода в изменение среднего расхода воды летне-осенней межени возрастает, а вклад количества осадков теплого периода снижается [Зуев и др., 2019].

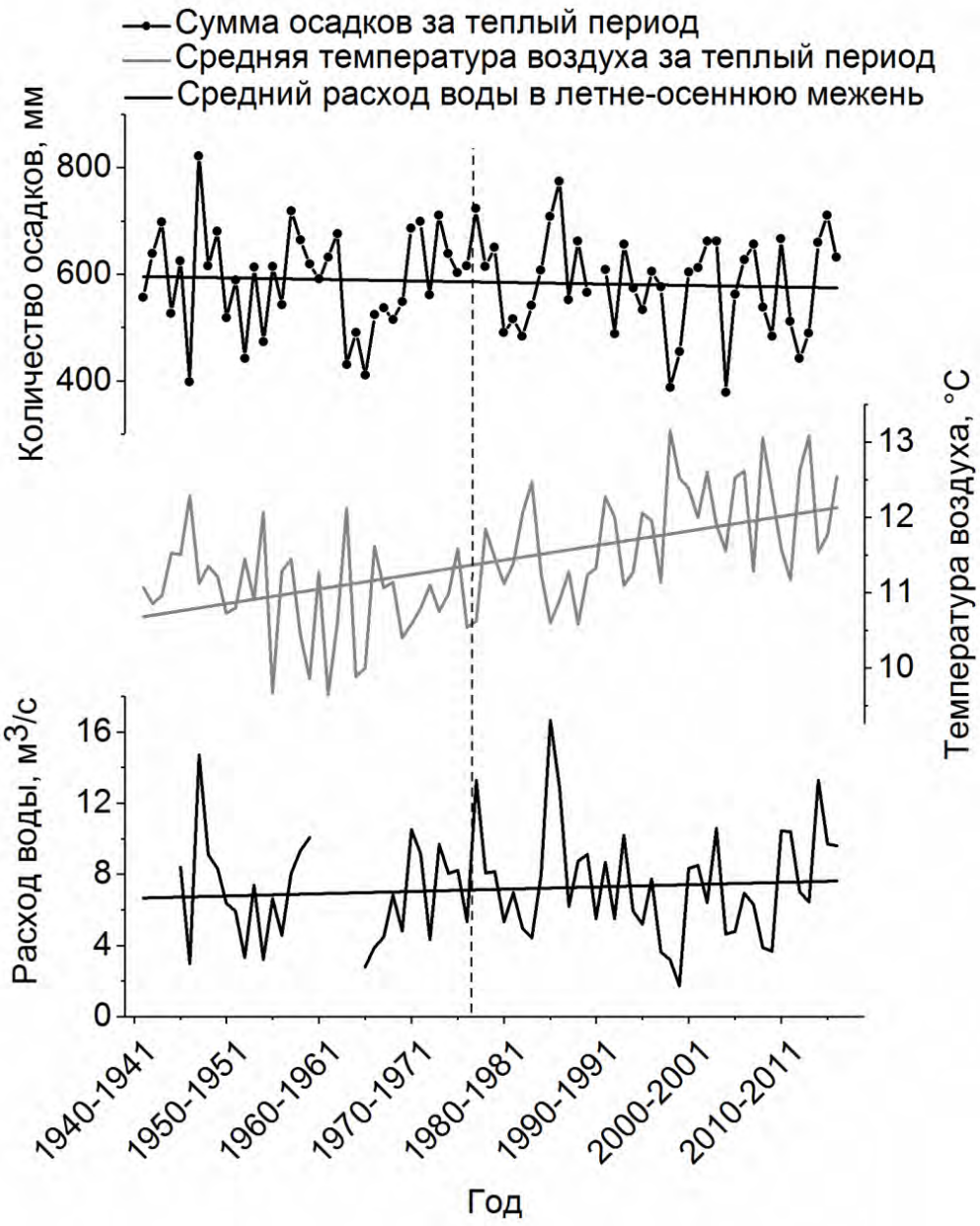



Рисунок 2.6 – Динамика изменения метеопараметров и средних расходов воды р. Майма за летне-осеннюю межень

*Зимняя межень.* С начала 1990-х годов наблюдается увеличение стока зимней межени (рисунок 2.7). Слабая, но значимая корреляционная связь (r = 0,37) между зимним расходом воды и осадками холодного периода проявляется в 1976–2016 гг., это подтверждает описанный ранее механизм увеличения зимнего стока в результате потепления зим. Тем не менее, с температурой холодного периода значимой связи не обнаруживается, хотя увеличение коэффициента корреляции в 1976–2016 гг. по сравнению с

1940–1975 гг. свидетельствует о возрастании вклада температурного фактора в формирование стока зимней межени (r = 0,07/0,26) [Зуев и др., 2019].

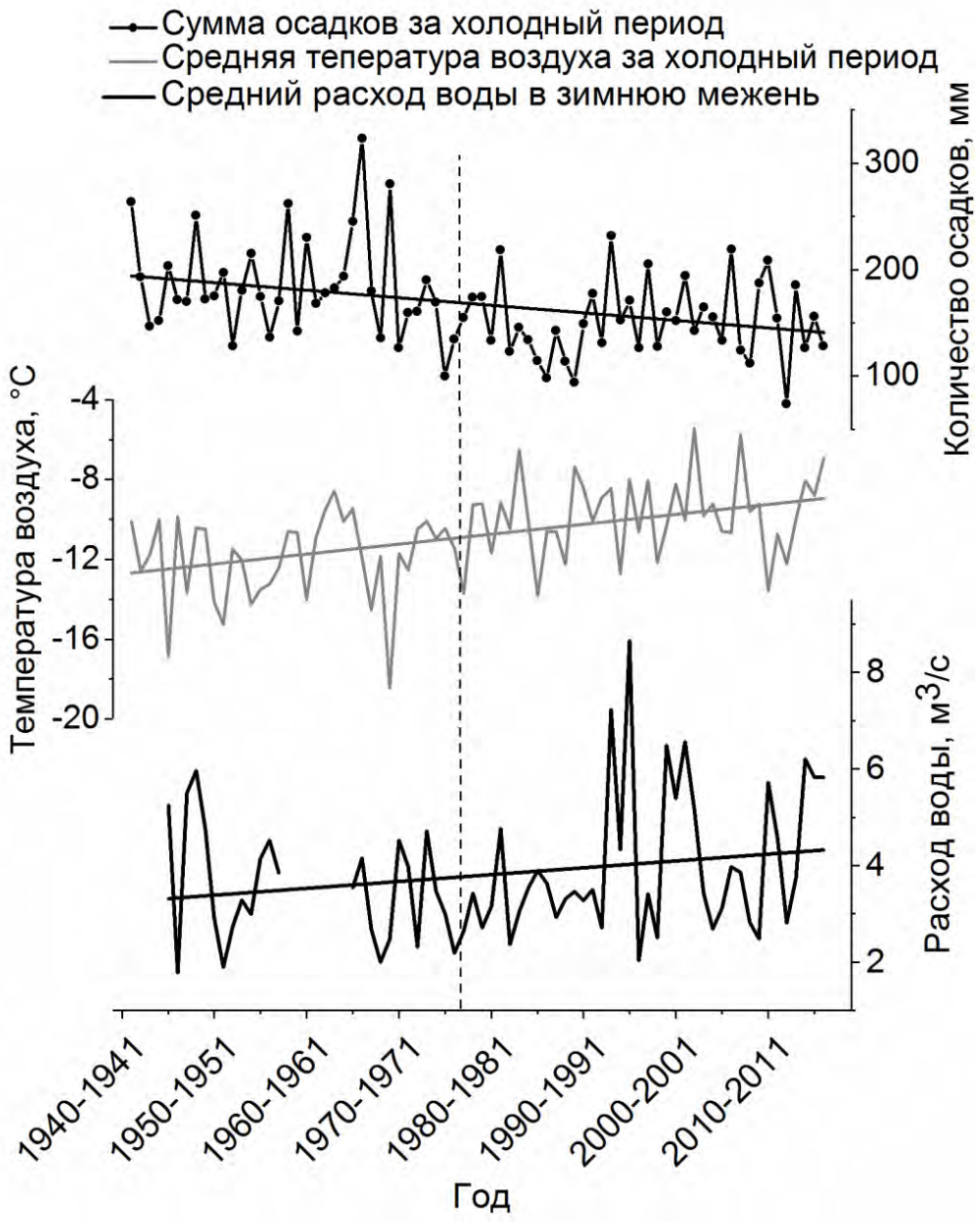



Рисунок 2.7 – Динамика изменения метеопараметров и средних расходов воды р. Майма за зимнюю межень

Для оценки сезонных изменений стока по данным о ежедневных расходах воды за периоды 1940–1975 и 1976–2016 гг. были определены средние месячные и средние сезонные расходы воды, их доли в процентах от среднего годового, а также средние максимальные расходы воды в половодье и средние минимальные в летне-осеннюю и зимнюю межень (таблица 2.4). Видно, что расходы воды во

все месяцы половодья в период современного изменения климата снижаются, особенно заметно снижение проявляется в апреле. Апрель для Маймы является самым многоводным месяцем, и в большинстве случаев пик половодья приходится именно на этот месяц. Средние максимальные расходы воды апреля в 1976–2016 гг. по сравнению с 1940–1975 гг. снизились с 91,2 $м^3/с$ до 59,3 $м^3/с$, т.е. на 35 %, объем половодья в среднем уменьшился на 9 % [Зуев и др., 2019].

Учитывая слабое изменение годового стока и уменьшение стока половодья, можно сделать вывод о перераспределении стока внутри года по сезонам. Так, из Таблицы 2.4 видно, что доля стока летне-осенней и зимней межени в период 1976–2016 гг. увеличивается на 5,4 % и 3,7 % соответственно. Наибольшее увеличение стока летне-осенней межени наблюдается в июле и августе, однако, в эти месяцы положительных тенденций атмосферных осадков не прослеживается, что свидетельствует об увеличении доли грунтового питания в формировании стока. Месяцем с самой низкой водностью является февраль, тем не менее, именно в феврале проявляется наибольшее в период зимней межени увеличение стока, связанное, по-видимому, с повышением числа зимних оттепелей и высоким положительным трендом температуры воздуха в феврале (таблица 2.1).

Тенденция к снижению годового стока в период современного изменения климата происходит в результате снижения водности половодья, однако, наряду с этим наблюдается перераспределение стока по сезонам года – при снижении водности половодья увеличивается водность летне-осенней и зимней межени [Зуев и др., 2019].

По результатам проведенных исследований установлено, что ключевым фактором изменений водного режима р. Майма являются климатические изменения, наблюдаемые в холодный период года. Повышение температуры воздуха в зимние месяцы способствует уменьшению глубины промерзания почвы и пополнению запасов грунтовых вод в периоды оттепелей и снеготаяния. В результате за счет увеличения доли грунтового питания сток зимней межени возрастает, а дружность половодья снижается. Снижение количества осадков холодного периода, наблюдаемое с 1976 года, и расходование их на сток в период

зимней межени, выражается в меньшем объеме половодья. Так, средние максимальные расходы воды в апреле 1976–2016 гг. по сравнению с 1940–1975 гг. снизились на 35 %, объем половодья в среднем уменьшился на 9 %. При отсутствии значимого тренда стока в летне-осеннюю межень в 1940–2016 гг. в его внутригодовом распределении выявлено увеличение водности этого сезона в 1976–2016 гг. на 5,4 %, главным образом, в результате повышения водности июля и августа. Отсутствие положительных трендов атмосферных осадков в июле и августе свидетельствует об увеличении грунтового питания [Зуев и др., 2019].

Таблица 2.4 – Изменения внутригодового распределения стока и средних максимальных расходов воды р. Майма – с. Майма в 1940–1975 и 1976–2016 гг.

| Период | **Половодье** | | | **Летне-осенняя межень** | | | | **Зимняя межень** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Апрель** | **Май** | **Июнь** | **Июль** | **Август** | **Сентябрь** | **Октябрь** | **Ноябрь** | **Декабрь** | **Январь** | **Февраль** | **Март** |
| **Средний расход воды, м3/с** | | | | | | | | | | | | |
| **1940-1975** | 32,08 | 19,62 | 9,80 | 7,31 | 6,53 | 6,76 | 6,57 | 6,06 | 3,49 | 2,44 | 2,06 | 4,04 |
| | **20,5** | | | **6,8** | | | | **3,6** | | | | |
| **1976-2016** | 23,94 | 14,11 | 9,53 | 8,17 | 8,09 | 6,67 | 7,27 | 6,15 | 3,68 | 3,00 | 2,88 | 4,45 |
| | **15,9** | | | **7,6** | | | | **4,0** | | | | |
| **Средний расход воды, %** | | | | | | | | | | | | |
| **1940-1975** | 30,0 | 18,4 | 9,18 | 6,85 | 6,12 | 6,34 | 6,15 | 5,68 | 3,27 | 2,28 | 1,93 | 3,78 |
| | **57,6** | | | **25,4** | | | | **16,9** | | | | |
| **1976-2016** | 24,4 | 14,4 | 9,73 | 8,34 | 8,26 | 6,81 | 7,43 | 6,28 | 3,76 | 3,06 | 2,95 | 4,55 |
| | **48,6** | | | **30,8** | | | | **20,6** | | | | |
| **Средние максимальные расходы воды в половодье, м3/с** | | | | | | | | | | | | |
| **1940-1975** | 91,2 | 51,0 | 25,9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | **56,0** | | | **-** | | | | **-** | | | | |
| **1976-2016** | 59,2 | 37,2 | 22,8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | **39,7** | | | **-** | | | | **-** | | | | |

## 2.3. Уровенный режим

Уровень воды – высота поверхности воды (в см), отсчитываемая относительно постоянной плоскости сравнения. Является одной из характеристик водного режима.

Для анализа уровенного режима использовались данные наблюдений Росгидромета по посту в с. Майма с 1940 г. по 2016 г. Данные о средней месячной температуре воздуха и количестве осадков на метеостанции в с. Кызыл-Озёк были получены с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД]. При расчете коэффициентов корреляции из исходных рядов удалялся линейный тренд. Оценки достоверности трендов и коэффициентов корреляции выполнены для уровня значимости 0,05. В работе использовались следующие границы гидрологических сезонов: зимняя межень – XI–III, половодье – IV–VI, летне-осенняя межень – VII–X. За холодный период принимался период с отрицательными средними многолетними температурами воздуха (ноябрь–март), за теплый – с положительными (апрель–октябрь).

### 2.3.1. Максимальный уровень половодья

Максимальный уровень воды в половодье определяется влагозапасами в снежном покрове на начало снеготаяния, показателем осеннего увлажнения, жидкими осадками в период снеготаяния, суровостью зимы и другими параметрами. Как показали исследования В. П. Галахова [Галахов, 2015], подавляющая часть объема половодья р. Майма формируется за счет таяния снега на водосборе. Анализ динамики внутригодового хода уровня воды за весь период наблюдений позволил установить, что в среднем весенний подъем уровня воды начинается в марте, а спад половодья фиксируется в июне, средняя дата наступления пика половодья – 17 апреля. Тенденции изменений максимального уровня воды, даты его наступления, температуры воздуха и осадков холодного периода хорошо проявляются при аппроксимации рядов наблюдений полиномом 3-й степени, т.к. временные ряды достаточно цикличны, без тенденций к росту или падению (рисунок 2.8 и 2.9) [Zuev et al., 2018].

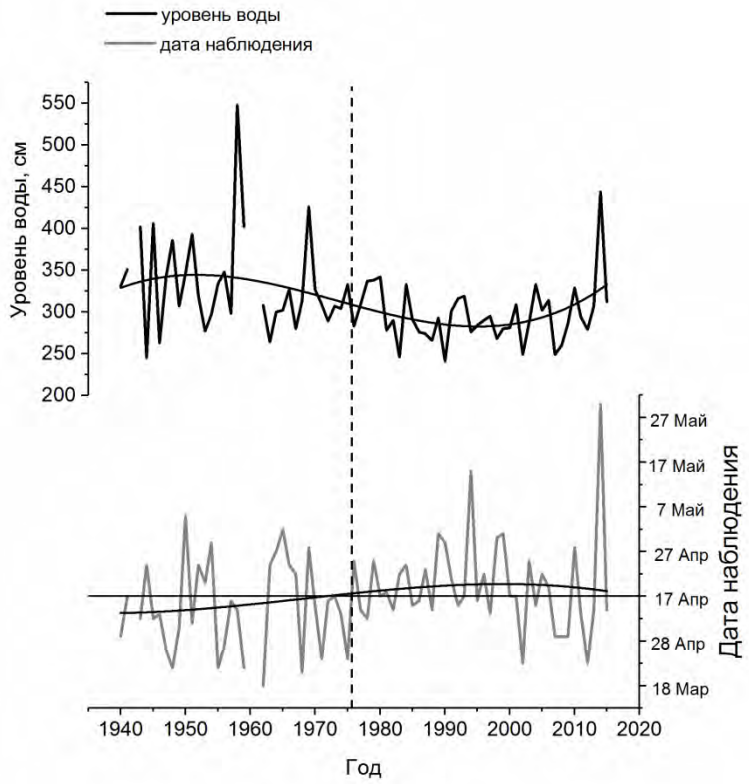



Рисунок 2.8 – Динамика максимального уровня половодья и даты его наблюдения; аппроксимация полиномом 3-й степени

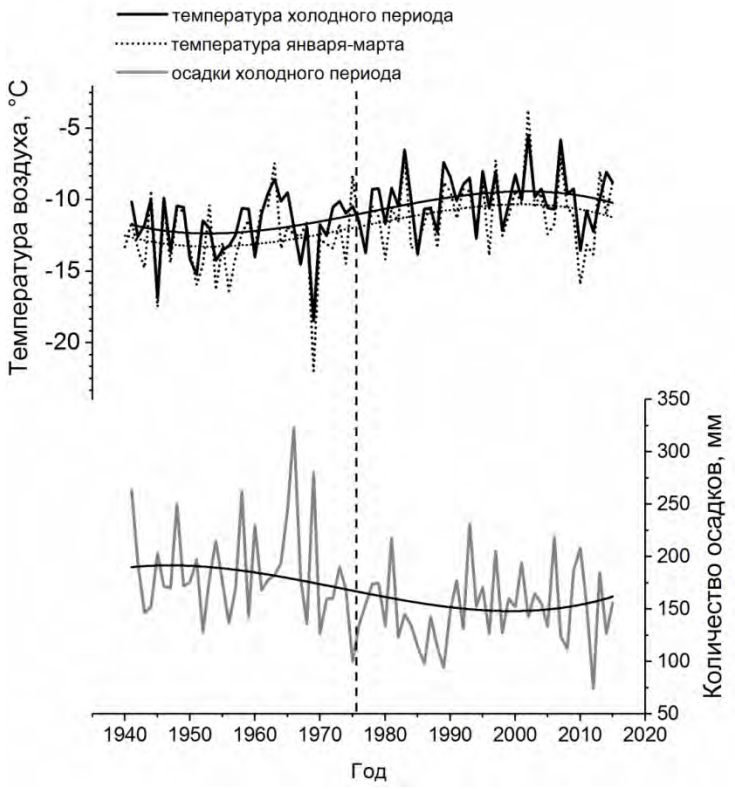



Рисунок 2.9 – Динамика температуры воздуха и количества осадков в холодный период года (XI–III); аппроксимация полиномом 3-й степени

Таблица 2.5 – Коэффициенты корреляции максимальных уровней воды в половодье и метеопараметров холодного периода

| Период | N | Средняя дата пика половодья | Максимальный средний уровень воды, см | Средняя температура воздуха, °С | Среднее количество осадков, мм | Максимальный средний уровень воды | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Температура воздуха (I-III) | Количество осадков |
| 1940-2016 | 76 | 17 апреля | 313 | -10,8 | 168 | **-0,37** | **0,31** |
| 1940-1975 | 36 | 15 апреля | 333 | -12 | 185 | **-0,40** | **0,33** |
| 1976-2016 | 40 | 19 апреля | 297 | -9,8 | 152 | **-0,31** | **0,26** |

*Значения коэффициентов, достоверных при уровне значимости 0,05, выделены жирным шрифтом, N – количество лет, взятое для расчета коэффициентов корреляции

Видно, что с начала периода современного изменения климата (1976 г.) отмечается снижение максимумов половодья (IV–VI) с повышением в последние годы (рисунок 2.8). Так, средний максимальный уровень в половодье в период 1940–1975 гг. составлял 333 см, в период 1976–2016 гг. – 297 см, т.е. изменения в среднем составили 36 см (таблица 2.5). Похожую тенденцию показывают осадки холодного периода, противоположную – температура холодного периода (рисунок 2.9). Повышение температур воздуха и количества дней с оттепелями в холодный период способствует сокращению глубины промерзания почвы и ранней водоотдаче из снежного покрова. Это приводит к пополнению запасов грунтовых вод, расходующихся на формирование поверхностного стока. В результате влагозапасы снежного покрова к началу весеннего снеготаяния уменьшаются, а с учетом снижения количества осадков холодного периода создаются условия для уменьшения максимальных уровней воды в половодье. Коэффициенты корреляции рядов максимальных уровней половодья с рядами температуры воздуха и осадков холодного периода невысоки, но значимы. Наиболее высокая связь максимумов половодья с температурой проявляется в январе–марте (I–III) – коэффициент корреляции –0,37 (при $p = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$). Для осадков значение коэффициента корреляции составляет 0,31 (при $p = 8{,}1 \cdot 10^{-3}$). (таблица 2.5). Очевидно, что преобладающий вклад в формирование

максимального уровня половодья вносит запас воды в снежном покрове на начало снеготаяния, однако, согласованность тенденций рассмотренных параметров говорит об их высокой зависимости в долгосрочной перспективе.

Наиболее низкие максимумы половодья характерны для 1980–2000 гг., в этот же период даты наступления максимума (рисунок 2.8) наблюдались преимущественно во второй половине апреля и начале мая. При низком количестве осадков холодного периода в 1989–1990, 1994 и 2014 гг. поздние даты наступления максимумов связаны с интенсивным выпадением жидких осадков. Например, экстремально высокий уровень воды, наблюдавшийся в конце мая 2014 года, был вызван выпадением в предгорьях Алтая двухмесячной нормы осадков за неделю [Зиновьев и др., 2016]. Поздние даты наступления максимума, не обусловленные выпадением жидких осадков, вероятно, связаны с меньшей глубиной промерзания почвогрунтов в зимний период и их более быстрым протаиванием в весенний. В таких условиях происходит интенсивное просачивание талой воды вглубь почвогрунтов, вследствие чего снижается и доля склонового стока и скорость поступления воды в реку. Таким образом, дата наступления максимума половодья смещается на более позднюю [Zuev et al., 2018].

В итоге тенденции изменения максимального уровня половодья за период инструментальных наблюдений определяются тенденциями изменений температуры воздуха и количества осадков холодного периода. Данные параметры, хотя и не являются основными факторами, определяющими максимум половодья, влияют на его характер. Снижение среднего уровня половодья в 1976–2016 гг. по сравнению с 1940–1975 гг. на 36 см обусловлено как уменьшением количества твердых осадков, так и потеплением зим, в результате которого происходит ранее снеготаяние и сокращение глубины промерзания почвы. Таким образом, часть талой снеговой воды расходуется на формирование зимнего стока, а часть просачивается в протаявшие почвогрунты, что обеспечивает более длительную водоотдачу и меньший подъем уровня воды в половодье [Zuev et al., 2018].

### 2.3.2. Минимальный уровень летне-осенней межени

В период летне-осенней межени для р. Майма характерны минимальные годовые значения уровня воды. В этот период Майма получает питание преимущественно за счет грунтовых вод и атмосферных осадков. Поэтому зависимость уровня воды и от количества осадков в летне-осеннюю межень очевидна. Повышение температуры воздуха в свою очередь оказывает влияние на испарение с водной поверхности, в результате чего объем водной массы и, соответственно, уровень воды может уменьшаться. Уменьшение стока р. Майма в летне-осеннюю межень, вследствие повышения температуры воздуха, отмечалось в работе В. В. Паромова с соавт. [2012]. При аппроксимации исследуемых рядов наблюдений уровня воды и метеопараметров полиномом третьей степени хорошо видно, что тенденция изменений минимального и среднего уровня воды и средней температуры воздуха противоположны (рисунок 2.10). При этом явных тенденций в изменении количества осадков не прослеживается. Тем не менее, между рядами количества осадков и осредненного уровня воды в летне-осеннюю межень за весь период наблюдений существует сильная корреляционная связь ($r = 0{,}73$, при $p = 3{,}1 \cdot 10^{-13}$). Значимая связь уровня воды и температуры воздуха проявляется только в период 1976–2016 гг., $r = -0{,}6$, при $p = 5{,}2 \cdot 10^{-5}$ [Zuev et al., 2018].

В период современного изменения климата даты наступления летне-осеннего минимума сместились на более ранние: в 1940–1975 гг. минимальный уровень воды наблюдался преимущественно в августе-октябре, в 1976–2016 гг. – в июле-сентябре. Стоит отметить, что рост температуры воздуха в теплый период отражается и на биологическом режиме р. Майма. Так, в 1994–95, 1998 и 2000–2001 гг. в результате благоприятных температурных условий в русле наблюдался интенсивный рост травы. Данный факт свидетельствует об увеличении теплозапаса водной массы в период летне-осенней межени [Zuev et al., 2018].

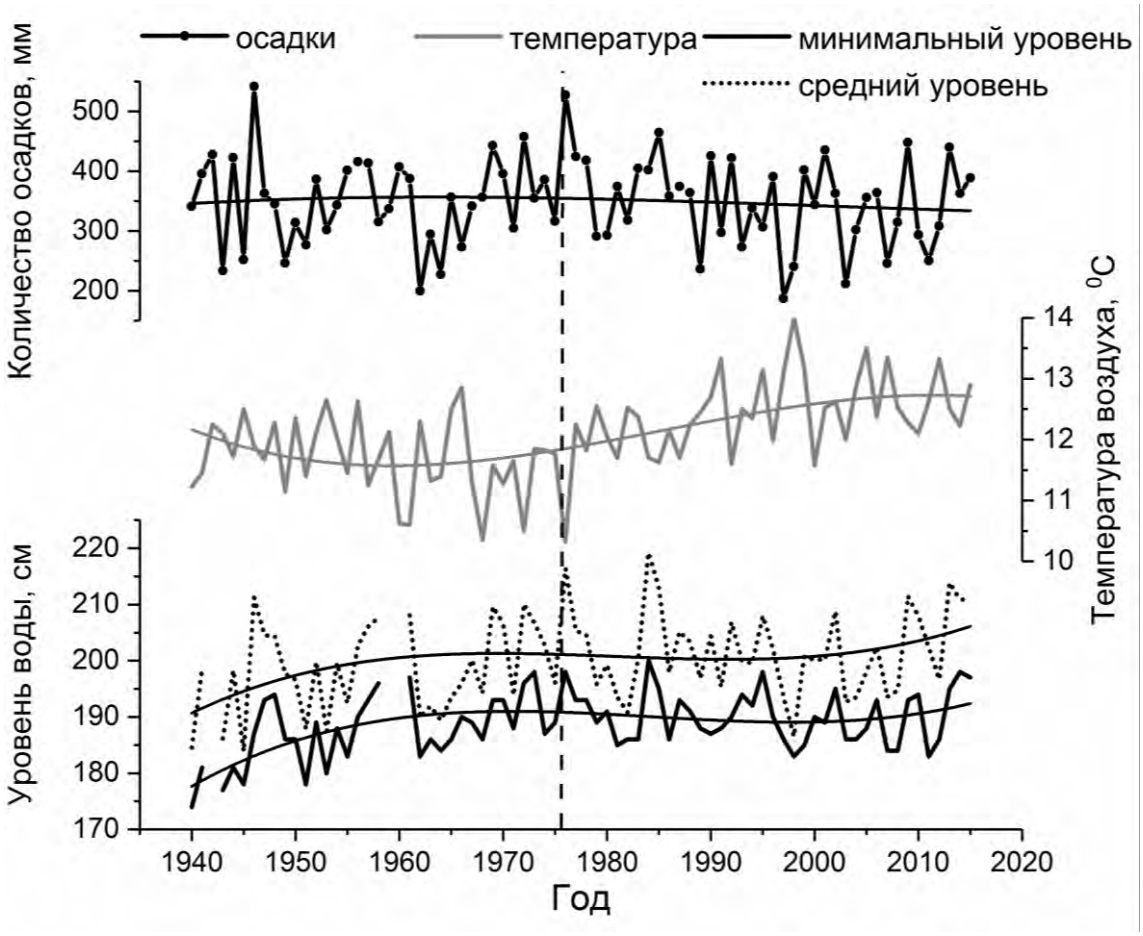



Рисунок 2.10 – Динамика среднего и минимального уровня воды, температуры воздуха и количества осадков в летне-осеннюю межень, аппроксимация полиномом 3-й степени

Таким образом, в период летне-осенней межени для р. Майма характерна высокая зависимость уровня воды от количества осадков ($r = 0{,}73$, при $p = 3{,}1 \cdot 10^{-13}$). Однако, тенденции изменений среднего и минимального уровня летне-осенней межени определяются тенденциями изменений температуры воздуха этого периода. Значимая корреляционная связь уровня воды с температурой воздуха ($r = -0{,}6$, при $p = 5{,}2 \cdot 10^{-5}$) проявляется только в 1976–2016 гг., что свидетельствует о росте вклада испарения в формирование уровней летне-осенней межени в период потепления климата [Zuev et al., 2018].

## 2.3.3. Максимальный зимний уровень

Для большинства рек Горного Алтая в предледоставный период характерны процессы образования донного и внутриводного льда – шуги [Ресурсы

поверхностных вод СССР, 1969; География Сибири…, 2016]. Шуга формируется при переохлаждении воды в условиях интенсивного турбулентного перемешивания, свойственного горным рекам с быстрыми течениями и каменистым дном. Вследствие шугоходов и зажорных явлений на реках Алтая нередко наблюдается значительный подъем уровня воды [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969]. На р. Майма зимний подъем уровня, вызванный прохождением шуги и зажорами, отмечается преимущественно в ноябре-декабре (XI–XII) и в некоторых случаях превышает средний многолетний уровень половодья (313 см).

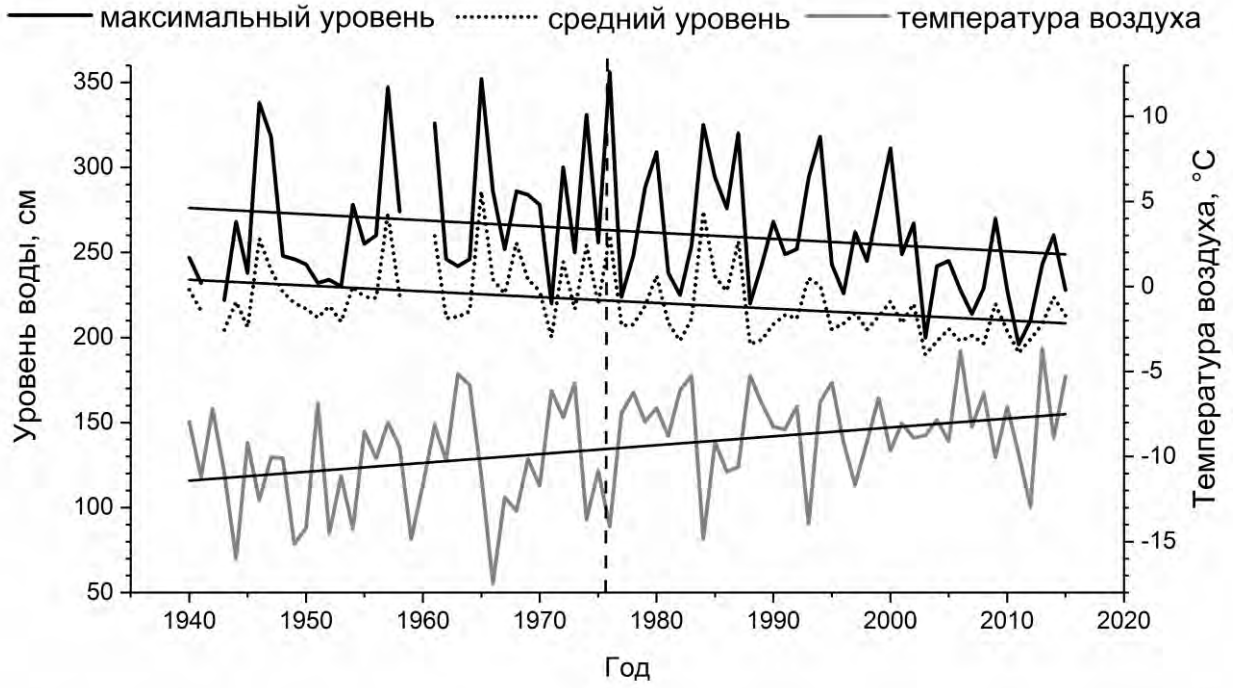



Рисунок 2.11 – Динамика максимального и среднего уровня воды и средней температуры воздуха в ноябре–декабре, линейные тренды

На Рисунке 2.11 представлена динамика изменения максимального и среднего уровня воды, а так же средней температуры воздуха за ноябрь–декабрь. Линейные тренды были выбраны для необходимости определения тенденций роста или падения временных рядов. Значения уровней воды, превышающих средний многолетний максимум половодья (313 см), наблюдаются в 1946–1947 гг., 1957, 1965, 1974, 1976 гг. и обусловлены возникновением зажора в начале ледостава при резком падении температуры воздуха. После 1976-го года зимних уровней воды, превышающих средний многолетний максимум половодья,

не наблюдается, напротив, прослеживается устойчивая тенденция к их снижению с коэффициентом линейного тренда 14 см/10 лет. В среднем максимальный уровень воды в ноябре–декабре в 1940–1975 гг. составлял 268 см, в 1976–2016 гг. – 257 см, т.е. за период современного изменения климата его снижение составило 11 см. Однако, несмотря на снижение максимального зимнего уровня для р. Майма характерно увеличение зимнего стока [Паромов и др., 2012]. Это связано с меньшим промерзанием почвогрунтов в более мягкие зимы и с таянием снега в участившиеся периоды с оттепелями, когда река получает дополнительное снеговое питание [Zuev et al., 2018].

Таблица 2.6 – Коэффициенты корреляции максимальных средних многолетних уровней воды и температуры воздуха

| Период | N | Максимальный средний уровень воды (XI-XII), см | Средняя температура воздуха, °С | | Средний уровень воды (XI-XII) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | VII-X | XI-XII | Температура воздуха (VII-X) | Температура воздуха (XI-XII) |
| 1940–2016 | 76 | 262,5 | 0,3 | -0,2 | **-0,39** | **-0,35** |
| 1940–1975 | 36 | 268 | -0,1 | -1,4 | -0,34 | -0,18 |
| 1976–2016 | 40 | 257 | 0,6 | 0,9 | **-0,44** | **-0,55** |

*Значения коэффициентов, достоверных при уровне значимости 0,05, выделены жирным шрифтом, N – количество лет, взятое для расчета коэффициентов корреляции

Несмотря на замедление потепления в 2000-х годах и понижение температур холодного периода в конце 2000-х/начале 2010-х гг., средняя температура ноября–декабря имеет устойчивый положительный тренд (рисунок 2.11). Рост температуры воздуха проявляется в падении максимальных и средних уровней воды в ноябре–декабре. Так, коэффициент корреляции между рядами осредненных за ноябрь–декабрь уровней воды и температур воздуха за весь период наблюдений составляет –0,35 (при $p = 2{,}6 \cdot 10^{-3}$), с 1940–1975 гг. связь практически отсутствует и равна –0,18 (при p = 0,32) , а в 1976–2016 гг. величина коэффициента корреляции увеличивается до –0,55 (при $p = 2{,}6 \cdot 10^{-4}$) и становится значимой (таблица 2.6). Интенсивность образования шуги обусловлена так же запасом тепла водной массы, формирующимся в период летне-осенней межени.

Коэффициент корреляции уровней воды в ноябре–декабре и температур воздуха летне-осенней межени (VII–X) за весь период наблюдений составляет –0,39 (при $p = 6{,}7 \cdot 10^{-4}$), с 1940–1975 гг. –0,34 (при $p = 4{,}9 \cdot 10^{-2}$) и увеличивается в 1976–2016 гг. до –0,44 (при $p = 4{,}9 \cdot 10^{-3}$). При расчете коэффициентов корреляции из исходных рядов удалялся линейный тренд (таблица 2.6). Так, при общем повышении температур воздуха наблюдается снижение максимальных зимних уровней воды, что свидетельствует о меньшем шугообразовании [Zuev et al., 2018].

## 2.4. Ледовый режим

Ледовый режим рек характеризуется совокупностью повторяющихся процессов возникновения, развития и исчезновения льда. Даты вскрытия, замерзания, и, следовательно, продолжительности ледостава на реке зависят от климатических условий речного бассейна, водности реки, гидравлического свойства потока и морфологических характеристик русла [Донченко, 1987].

Замерзание реки, т. е. появление первичных форм ледообразования, начинается при переходе средней суточной температуры воздуха осенью через 0 °С. В начальную фазу осенних ледовых явлений образуются забереги у берегов узкими полосками неподвижного льда и сало – плывущими кусками ледяной пленки, состоящей из кристаллов льда в виде тонких игл. На малых реках ледостав наступает в основном путем расширения и смерзания заберегов. Ледостав горных рек часто сопровождается внутриводным льдом – шугой, которая нередко забивает живое сечение реки подо льдом, вследствие чего возникают зажоры, т. е. резкие подъемы уровня воды. Некоторые участки горных рек за счет высоких скоростей течения вовсе могут не замерзать в течение долгого времени. Такие участки называют полыньями. Вскрытие реки начинается с наступлением весны. Ледяной покров разрушается под действием солнечной радиации, поступлением теплого воздуха, теплых вод и механического воздействия текущей талой воды [Михайлов и др., 2005].

Для анализа ледового режима р. Майма использовались данные с гидрологических ежегодников бассейна Карского моря (западная часть) составленные на основе наблюдений сети станций и постов Росгидромета. Период наблюдений с 1940 г. по 2016 г. по гидрологическому посту, расположенному в с. Майма. Данные о средней месячной температуре воздуха на метеостанции в с. Кызыл-Озёк за холодный период (с ноября по март включительно [Харламова, 2013]) были получены с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД].

### 2.4.1. Продолжительность ледостава

На большинстве рек Западной Сибири за последнее столетие отмечается статистически значимое смягчение ледового режима. Сроки появления льда становятся более поздними, а сроки вскрытия – более ранними [Гинзбург, 2005].

При потеплении климата ледовый режим является наиболее чувствительным элементом гидрологического режима водных объектов. Даты установления и разрушения ледового покрова, а также продолжительность ледостава зависят от температуры воздуха холодного и переходных периодов, от продолжительности устойчивого морозного периода и теплозапаза водной массы. На р. Майма с зимы 1975–1976 года наблюдается значительное уменьшение продолжительности ледостава (рисунок 2.12) и рост количества дней с ледовыми явлениями: чаще отмечаются шугоходы различной интенсивности, сало, забереги и полынья; участились случаи неполного ледостава. В 1940–1975 гг. продолжительность ледостава изменялась в диапазоне от 117 до 164 дней и в среднем составляла 140 дней при средней температуре холодного периода –12 °С (таблица 2.7). По данным гидрологических ежегодников в этот период отмечалось частичное промерзание реки и интенсивное шугообразование (1962–1963, 1965, 1967–1969, 1974–1975 годы). В 1976–2016 гг. средняя продолжительность ледостава уменьшилась почти в 2,5 раза и составляла 58 дней. При этом в некоторые годы ледостав отсутствовал полностью, либо имел продолжительность не более двух недель (1996–1997 гг., 2003–2004 гг., 2005–2007 гг.) [Зуев и др., 2019].

Таблица 2.7 – Характеристика ледового режима реки Майма

| Период | Средняя температура воздуха холодного периода | Средняя продолжитель-ность ледостава, дни | СКО дней | Средняя дата замерзания | СКО дней | Средняя дата вскрытия | СКО дней |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1940-2016 | -10,8 °С | 95 | - | 29 ноября | - | 16 марта | - |
| 1940-1975 | -12 °С | 140 | 11 | 19 ноября | 13 | 6 апреля | 8 |
| 1976-2016 | -9,8 °С | 58 | 19 | 10 декабря | 39 | 25 февраля | 32 |

*СКО – среднеквадратическое отклонение

Рисунок 2.12 – Динамика средней температуры воздуха холодного периода и продолжительности ледостава р. Майма

## 2.4.2. Даты вскрытия и замерзания реки

Продолжительность ледостава в 1976–2016 гг. сокращалась как за счет более поздних дат замерзания, так и за счет более ранних дат вскрытия (рисунок 2.13). Смещению дат вскрытия и замерзания способствовали высокие

положительные тренды температуры воздуха в ноябре–декабре и феврале–марте (таблица 2.1) [Зуев и др., 2019].

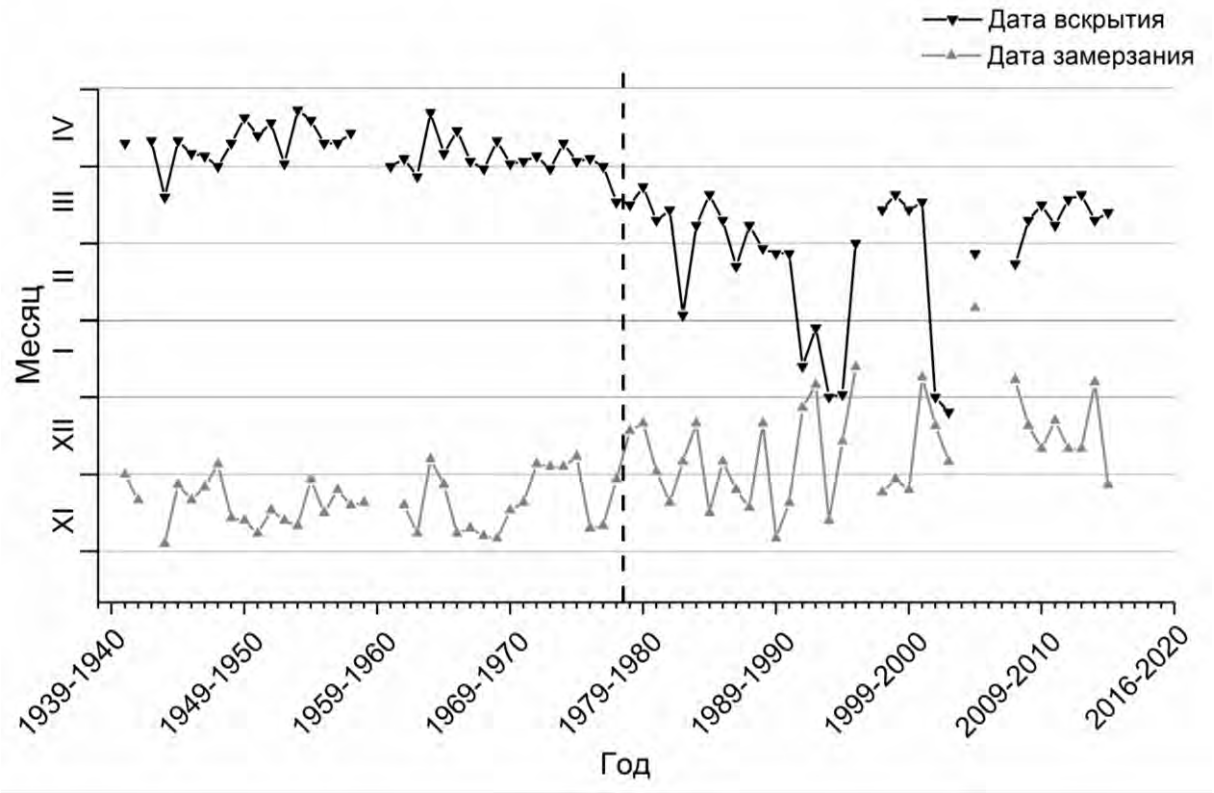



Рисунок 2.13 – Динамика дат вскрытия и замерзания р. Майма

С 1976 года значительно возросла изменчивость дат вскрытия и замерзания реки, что отразилось и на изменчивости продолжительности ледостава. Так, среднеквадратическое отклонение продолжительности ледостава в 1940–1975 гг. составило 11 дней, дат вскрытия 8 дней, замерзания – 13 дней, в 1976–2016 гг. – 19, 32 и 39 дней соответственно, т.е. изменчивость возросла в 2–3 раза (таблица 2.7). Видно, что в период до 1976 года ледостав на Майме устанавливался в ноябре или в первой декаде декабря – средняя дата замерзания 19 ноября. В период 1976–2016 гг. образование ледостава в среднем стало наблюдаться позже – средняя дата замерзания 10 декабря; в отдельные годы замерзание реки приходилось на первую декаду января, а в 2005 году река покрылась льдом только 3 февраля. Вскрытие р. Майма до 1976 г. наблюдалось преимущественно в апреле и последней декаде марта – средняя дата вскрытия 6 апреля; после 1976 года даты вскрытия сместились на февраль–март, а в отдельные годы – на январь и даже декабрь, средняя дата вскрытия 25 февраля

(таблица 2.7). В условиях такого значительного разброса дат вскрытия и замерзания в последние 40 лет определение четких границ переходных сезонов не представляется возможным. Тем не менее, очевидна зависимость продолжительности ледостава от средней температуры холодного периода – коэффициент корреляции параметров за весь период наблюдений равен 0,62 (при $p = 7{,}2 \cdot 10^{-9}$) , что свидетельствует о средней силе связи. Отметим, что величина коэффициента корреляции объясняется ростом вклада в процесс замерзания реки фактора теплозапасов водной массы, увеличивающихся вследствие роста температур воздуха в период летне-осенней межени и поступления талой снеговой воды в реку в периоды зимних оттепелей [Зуев и др., 2019].

## Выводы по главе 2

1) Ключевым фактором изменений водного режима р. Майма являются климатические изменения, наблюдаемые в холодный период года. Средние максимальные расходы воды в апреле 1976–2016 гг. по сравнению с 1940–1975 гг. снизились на 35 %, объем половодья в среднем уменьшился на 9 %, увеличилась водность в летне-осеннюю межень в период с 1976–2016 гг. на 5,4 %, главным образом, в результате повышения водности июля и августа.

2) При общем повышении температур воздуха с 1976 г. на реке Майма наблюдается снижение максимальных зимних уровней воды (коэффициент линейного тренда 14 см/10 лет).

3) Потепление зим проявляется в ледовом режиме р. Майма: с начала периода современного изменения климата (1976 г.) наблюдается сокращение продолжительности ледостава, смещение дат замерзания реки – на более поздние, а дат вскрытия – на более ранние.

# ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕКИ МАЙМА

Как в России [Кузьмин и др., 2011], так и за рубежом [Moore et al., 2005; Lu et al., 2008; Cloke et al., 2009; Leedal et al., 2010; Demeritt et al., 2013; Morsy et al., 2018; Thomas et al., 2019] система оповещения о надвигающемся наводнении играет не малую роль в оперативном принятии мер по уменьшению ущерба. Причины возникновения наводнений на реках давно известны: продолжительные интенсивные дожди и ливни [Edouard et al., 2018], таяние снегов и ледников, прохождение заторов и зажоров. Также, в последние несколько десятков лет, влияние антропогенных факторов на формирование наводнений играет одну из главных ролей: вырубка леса, хозяйственное освоение пойм, продольная распашка склонов, т.е. нерациональное ведение сельского хозяйства и т.д. [Авакян, 2001]. В результате всех этих факторов снижаются инфильтрационные свойства почв, поверхностный сток увеличивается и резко возрастает интенсивность паводков [Komma et al., 2008; Nikolopoulos et al., 201; Зуев и др., 2020а].

Для уменьшения опасности наводнений требуется совершенствование методов долговременного прогноза [Hossain et al., 2006; Болгов и др., 2013б; Безруков и др., 2014; Corral et al., 2019], прогноза в режиме «наукастинг» и сбор детальной гидрометеорологической информации о бассейне реки, учитывая действующий прогноз погоды (рисунок 3.1). Эти данные позволяют наиболее точно предсказать масштабы наводнения и уберечь население от ЧС [Davis, 2001]. Из чего следует, что для успешного решения задач климатического и экологического мониторинга необходимо иметь сеть станций сбора характеристик окружающей среды. Большое количество станций требует больших затрат, значит, сеть станций должна удовлетворять следующим требованиям: низкое энергопотребление, широкий набор интерфейсов подключения датчиков, широкий диапазон условий эксплуатации, дистанционно управляемый режим работы. Этим требованиям соответствуют различные

модификации системы автономного мониторинга состояния окружающей среды, разработанного учеными в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН г. Томска (ИМКЭС СО РАН) [Кураков, 2012; Зуев и др., 2020а].

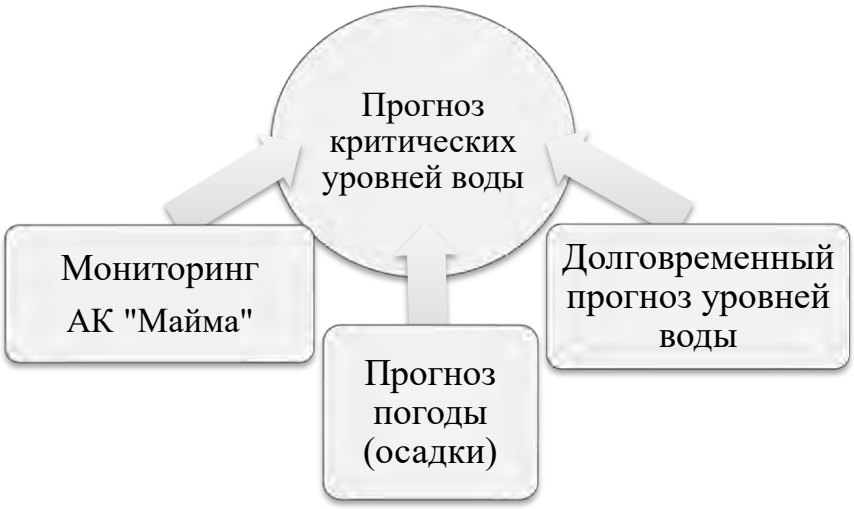



Рисунок 3.1 – Блок-схема прогноза наводнения

Для последующего исследования были использованы данные о температуре воздуха, количестве осадков и уровне воды, полученные с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД], данные с гидрологических ежегодников по гидрологическому посту в с. Майма. С автономного комплекса «Майма» использовались данные о высоте снежного покрова, количестве осадков, температуре воздуха, уровне воды, температуре воды, влажности почвы и температуре почвы на глубину до 110 см.

## 3.1. Автономный измерительный комплекс «Майма»

Многопараметрический измерительный автономный комплекс «Майма» (АК «Майма») является модернизированной версией автоматизированного агропромышленного измерительного комплекса (АПИК), апробация которого прошла в 2013–2014 гг. на территории учебно-научного стационара Алтайского госуниверситета «Озеро Красилово» [Кураков, 2012; Зуев и др., 2016].

АК «Майма» установлен и функционирует в бассейне реки Майма уже больше четырех лет (рисунок 3.2). Система наблюдения на реке распределена в

нескольких точках по местности, начиная от ее истока: в с. Урлу-Аспак (№ 1), пос. Филиал (№ 2) и окрестностях с. Кызыл-Озёк (№ 3) (рисунок 3.3). Информация с АК «Майма» регистрируется и передается на сервер ИМКЭС СО РАН каждый час. Задать интервал можно с минимального значения в 15 минут. Выбор места размещения точек был основан на территориальном различии в типах почв, грунте и растительности, их однородности.

Рисунок 3.2 – Расположение датчиков на примере пункта наблюдения № 1 (с. Урлу-Аспак)

Из Таблицы 3.1 видно, что в число измеряемых параметров входят: высота снежного покрова, атмосферное давление, влажность и температура воздуха, количество осадков, температура почвы в метровом слое, уровень и температура воды, количество солнечной радиации, скорость и направление ветра [Зуев и др., 2017]. Сеть станций и постов Росгидромета не охватывает такое количество гидрометеорологической информации и не обладает возможностью размещения большого количества пунктов для ее сбора, поэтому чрезвычайно важно размещения дополнительных источников гидрометеорологических данных.

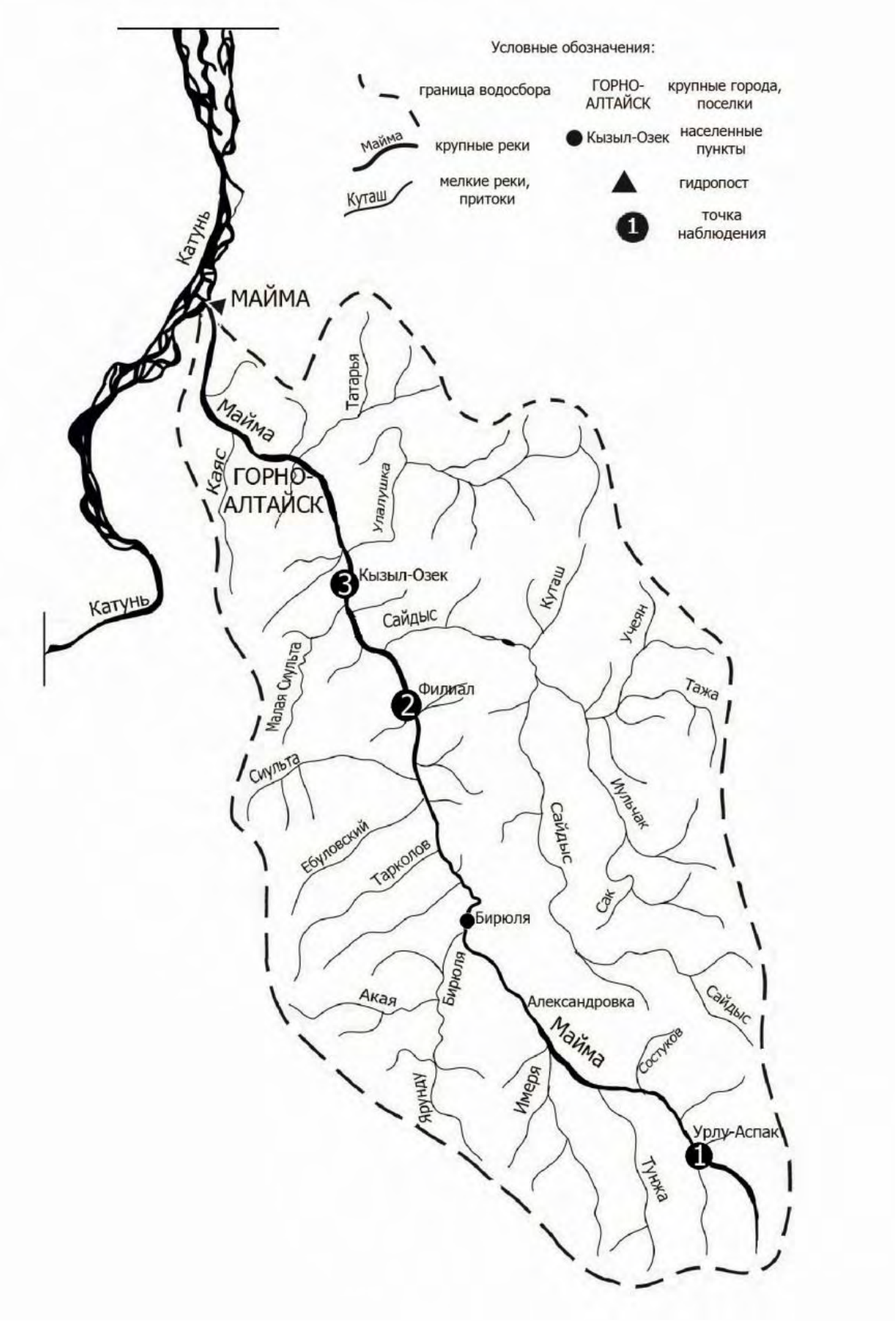



Рисунок 3.3 – Картосхема бассейна р. Майма (расположение измерительных точек АК «Майма»)

Таблица 3.1 – Получаемые данные с автономного комплекса «Майма»

<table>
<tr><td>Номер пункта</td><td>№ 2<br>пос. Филиал</td><td>№ 1<br>с. Урлу-Аспак</td><td>№ 3<br>с. Кызыл-Озёк</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Получаемые данные</td><td colspan="3">Высота снежного покрова, мм</td></tr>
<tr><td colspan="3">Атмосферное давление, мм.рт.ст.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Жидкие осадки, мм</td></tr>
<tr><td colspan="3">Температура почвы на глубине до 1,1 м<br>(15 точек с различным шагом измерения), °С</td></tr>
<tr><td colspan="3">Влажность воздуха, 2 м, %</td></tr>
<tr><td colspan="3">Температура воздуха, °С</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Температура воды, °С</td><td colspan="2">Скорость ветра, м/с</td></tr>
<tr><td colspan="2">Направление ветра, град</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Уровень воды, мм</td><td rowspan="2">Солнечная радиация, Вт/м$^2$</td><td>Температура грунта,<br>0,1 см, °С</td></tr>
<tr><td>Влажность грунта,<br>0,1 см, %</td></tr>
</table>

### 3.1.1. Технические характеристики автономного измерительного комплекса «Майма»

На плате контроллера кроме ATmega644, имеющего 10 разрядный 8 канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), располагаются часы PCF8563T, память AT45DB321D, USB-интерфейс FT232RL, стабилизаторы напряжения и свинцовый аккумулятор 10 Ампер*часов с солнечной батареей [Кураков, 2012]. В Таблице 3.1 перечислены данные, которые позволяет считывать АК «Майма» с помощью датчиков (регистраторов). Их технические характеристики:

*1) Датчик высоты снежного покрова, мм.* Датчик высоты снежного покрова содержит цифровые термометры, равномерно расположенные на рейке, которая фиксируется треногой в верхней точке, однопроводный интерфейс, регистратор, компьютер с программой и кабель USB [Датчик высоты снежного покрова…, 2015]. Диапазон измерений 0…10,5 м, погрешность ±0,05 м [Кураков, 2012].

*2) Датчик атмосферного давления, мм. рт. ст.* Датчик атмосферного давления MPXAZ6115AC6 [Freescale Sensors] устанавливается на плате контроллера. Диапазон измерений 600…800 мм. рт. ст., погрешность ±1,5 % [Кураков, 2012].

*3) Датчик жидких осадков, мм.* Датчик счётчика количества жидких осадков является компонентом от метеостанции фирмы Davis Rain Collector II [Rain Collector II], которая является сертифицированным по стандарту прибором, имея погрешность ±0,2 мм [Кураков, 2012]. Диапазон измерения от 0,0 мм до 6553 мм [Rain Collector II].

*4) Датчик температуры почвы (глубина до 1,1 м), °С.* Зонд профиля температуры грунта цифровой температурный датчик DS18B20 [Датчик температуры…] (12 шт), покрыт плат лаком, имеет герметичный корпус для выдержки погружения на глубину, защитой от влаги является силикагель, располагается в полипропиленовой трубе, диаметром 25 мм. Измеряет на глубину до 3,2 м. Диапазон измерений –55…+50 °С, погрешность ±0,1 °С [Кураков, 2012].

*5) Датчик влажности грунта, %.* Датчик влажности грунта TRIME-PICO32 со встроенной электроникой TDR (Test Data Recorder) [TRIME-PICO 32…]. Диапазон измерений 0…100 %, погрешность 0...40 %: ±1 %; 40...70 %: ±2 %. Температурный диапазон: –15…+50 °С [Кураков, 2012] с помощью датчика DS18B20 [Датчик температуры…].

*6) Датчик влажности воздуха (на высоте 2 м), %.* Датчик влажности воздуха HIH-4021-003 [Honeywell]. Диапазон измерений 0…100 %, погрешность ±3,5 % [Кураков, 2012].

*7) Датчик температуры воздуха, °С.* Датчик температуры воздуха – цифровой датчик DS18B20 [Датчик температуры…], паспортная точность с помощью калибровки [Кураков, 2012] повышается с ±2 °С до ±0,1 °С, диапазон измерений –40…+50 °С [Кураков и др., 2008].

*8) Датчик уровня воды, мм.* Датчик уровня воды сделан на основе дифференциального датчика давления, заливаемого герметиком в бронзовой трубке и имеющего полый соединительный кабель для компенсации изменения

атмосферного давления. Диапазон измерений 0…10,5 м, погрешность ±1 % [Кураков, 2012].

*9) Датчик температуры воды, °С.* Датчик температуры воды – цифровой датчик DS18B20 [Датчик температуры…], диапазон измерений –40…+50 °С, точность с ±2 °С до ±0,1 °С [Кураков, 2012].

*10) Датчик скорости (м/с) и направление ветра (град).* Датчики скорости и направления ветра являются компонентами от метеостанции фирмы Davis Anemometer [Anemometer for…], которая является сертифицированным по стандарту прибором, имея диапазон измерений для скорости ветра 0,9…78 м/с, погрешность ±5 %, для направления ветра – 0…360° и погрешность ±7 % [Кураков, 2012].

*11) Датчик солнечной радиации, Вт/м$^2$.* Диапазон измерений 0,2…10 мкм, погрешность ±5 %, 10–2000 Вт/м$^2$ [Кураков, 2012].

На Рисунке 3.4 для примера показан скриншот Центра Управления Регистраторами (ЦУР) и выгруженный файл Exsel с данными по каждому датчику с начала наблюдений в пункте № 2 (пос. Филиал).

Из вышеописанного ясно, что автономный измерительный комплекс «Майма» не является типовой метеостанцией. Это измеритель, конфигурируемый для сбора определённых параметров, которые могут выходить за рамки стандартных метеонаблюдений. Он прост в установке и обслуживании, имеет малый вес и габариты всего оборудования. Программное обеспечение дает возможность без вскрытия корпуса задавать режим работы, считывать накопленную информацию и обновлять программу микроконтроллера в режиме on-line [Кураков, 2012].

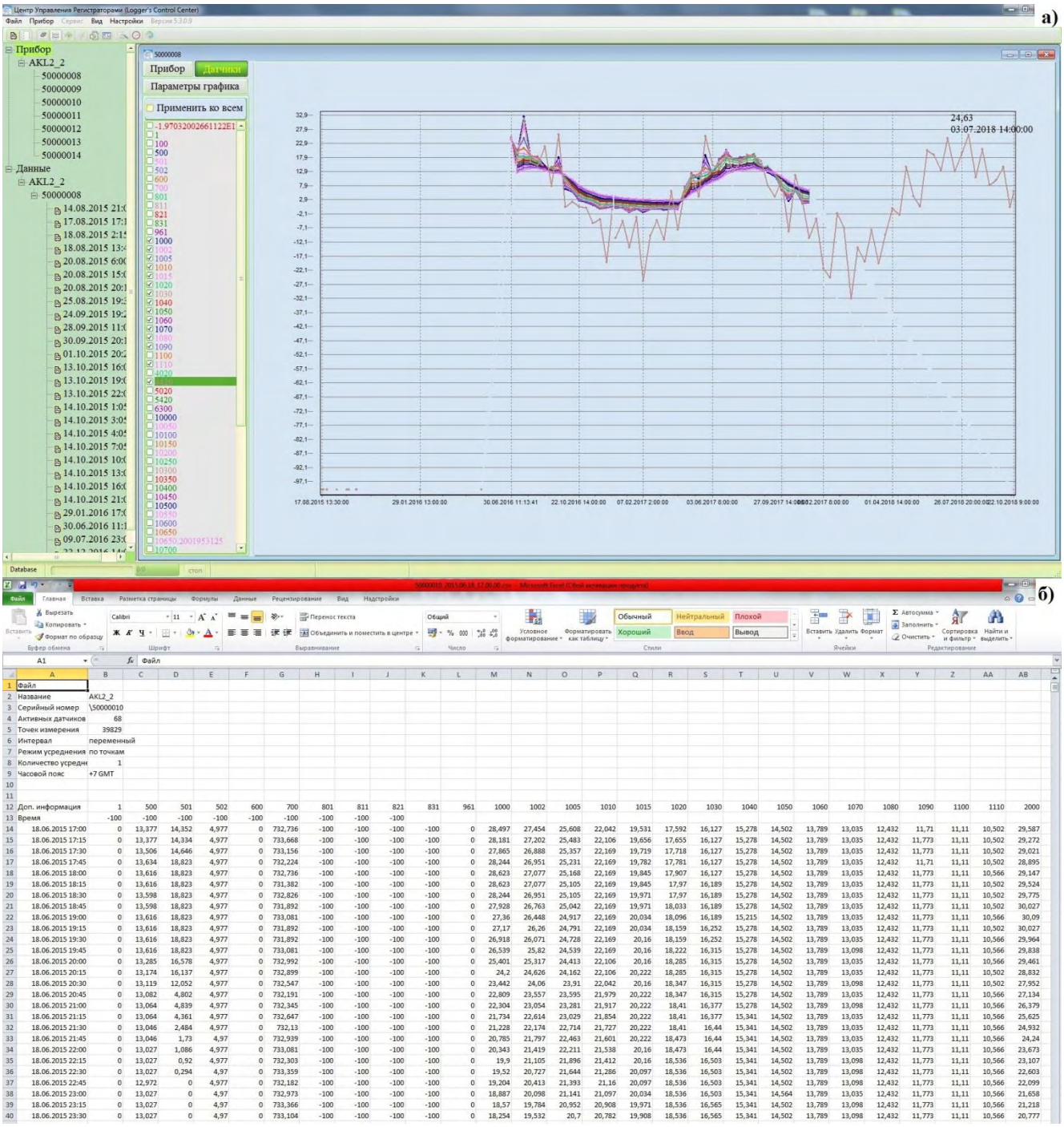



Рисунок 3.4 – Скриншоты а) Центра Управления Регистраторами;
б) выгруженного файла Exsel с данными

## 3.2. Сравнительный анализ гидрометеорологических характеристик наблюдений Росгидромета и автономного комплекса «Майма»

Для сравнительного анализа были использованы данные АК «Майма» и Рогидромета об уровне воды в реке, температуре воздуха и количестве осадков за

2017 год. В анализе участвовали две измерительные точки АК «Майма»: пункт наблюдения в пос. Филиал (уровень воды), расположенный в 22 км выше по течению реки от гидропоста, и пункт наблюдения в окрестностях с. Кызыл-Озёк (температура воздуха, количество осадков), расположенный на расстоянии 4 км от метеостанции в с. Кызыл-Озёк. Данные о ежедневной температуре воздуха и суточном количестве осадков на метеостанции в с. Кызыл-Озёк были получены с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД], данные об уровне воды – с гидрологических ежегодников по посту в с. Майма. Статистические расчеты выполнены в пакете STATISTICA 10.

Для проведения анализа ряды наблюдений АК «Майма» приводились к суточным значениям: уровень воды и температура воздуха – к средним суточным, количество атмосферных осадков – к суммарным значениям за сутки. Поскольку данные по гидропосту в с. Майма в 2017 году были доступны только за период открытого русла, выборка была ограничена периодом с марта по ноябрь. Доступный диапазон температурных данных составляет полный календарный год. Данные о количестве осадков в 2017 году в пункте наблюдения АК «Майма» доступны за период с января по июль. Характеристики взятых для анализа рядов наблюдений представлены в Таблице 3.2 [Зуев и др., 2018].

Таблица 3.2 – Характеристики взятых для анализа рядов наблюдений

| Параметр | Анализируемый период | Объем выборки | Средние значения | | Разность средних значений |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Росгидромет | АК «Майма» | |
| Уровень воды, см | 15.03–15.11.2017 | 233 | 218 | 132 | 86 |
| Температура воздуха, °С | 01.01–30.12.2017 | 364 | 4,01 | 3,3 | 0,71 |
| Количество садков, мм | 01.01–20.07.2017 | 201 | 2,08 | 1,58 | 0,5 |

Ряды уровней воды по данным Росгидромета и АК «Майма» имеют значительные различия в абсолютных величинах. Это связано с тем, что датчик уровня воды АК «Майма» не привязан к нулю графика гидрологического поста в с. Майма, по этой же причине данные различия не являются объективными. Тем не менее, в динамике изменения уровня воды по данным обоих источников

визуально наблюдается хорошее соответствие суточного хода (рисунок 3.5). Датчик уровня воды, работая в непрерывном режиме, улавливает все основные колебания, связанные с прохождением волн половодья в период активного снеготаяния и выпадением жидких осадков.

Из Таблицы 3.2 следует, что значения температуры воздуха и количества осадков, измеренные АК «Майма», в среднем несколько ниже аналогичных значений для метеостанции Кызыл-Озёк. На Рисунке 3.6 и 3.7 представлены гистограммы средних месячных значений температуры воздуха и суммарных за месяц значений атмосферных осадков в 2017 году. Видно, что данные температуры воздуха в пункте наблюдения АК «Майма» фактически повторяют температурные данные метеостанции Кызыл-Озёк, максимальные различия в 1–3 °С наблюдаются в холодную часть года (рисунок 3.6). Незначительные различия месячных сумм осадков, измеренных на метеостанции Кызыл-Озёк и АК «Майма», характерны для марта, апреля, июня и июля, наибольшая разница наблюдается в январе, феврале и мае (рисунок 3.7) [Зуев и др., 2018].

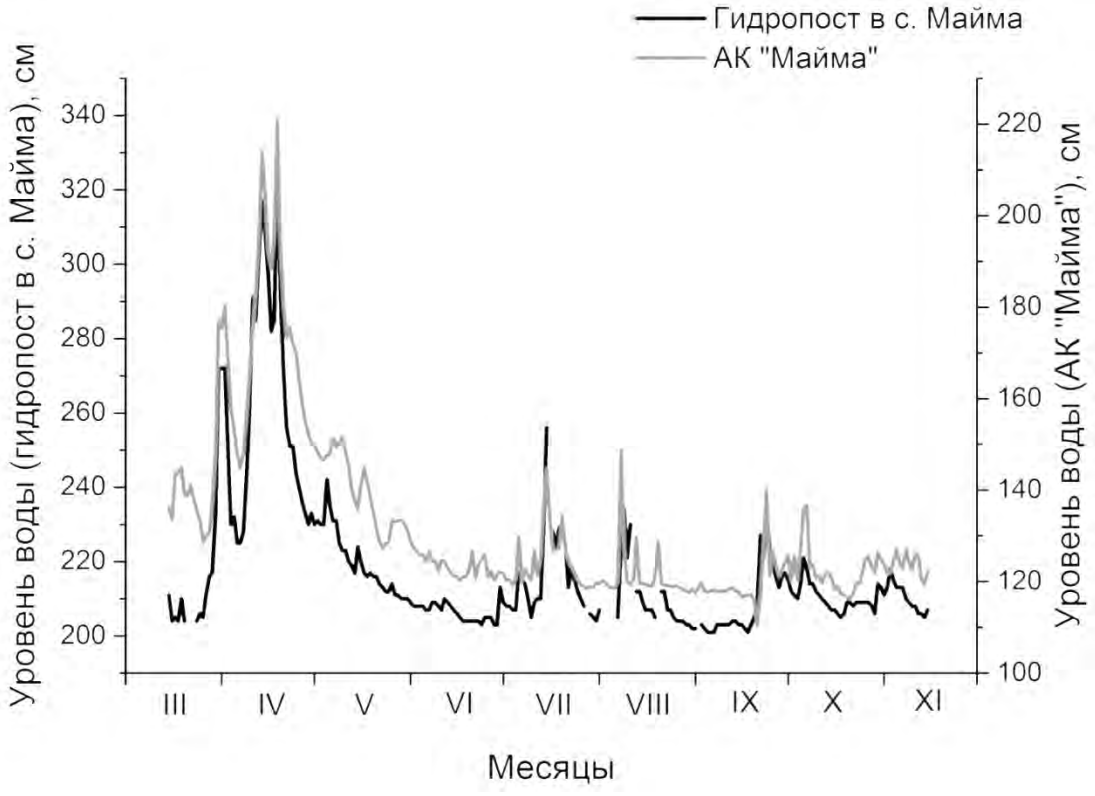



Рисунок 3.5 – Динамика изменения уровня воды р. Майма за период открытого русла (март–ноябрь 2017 г.)

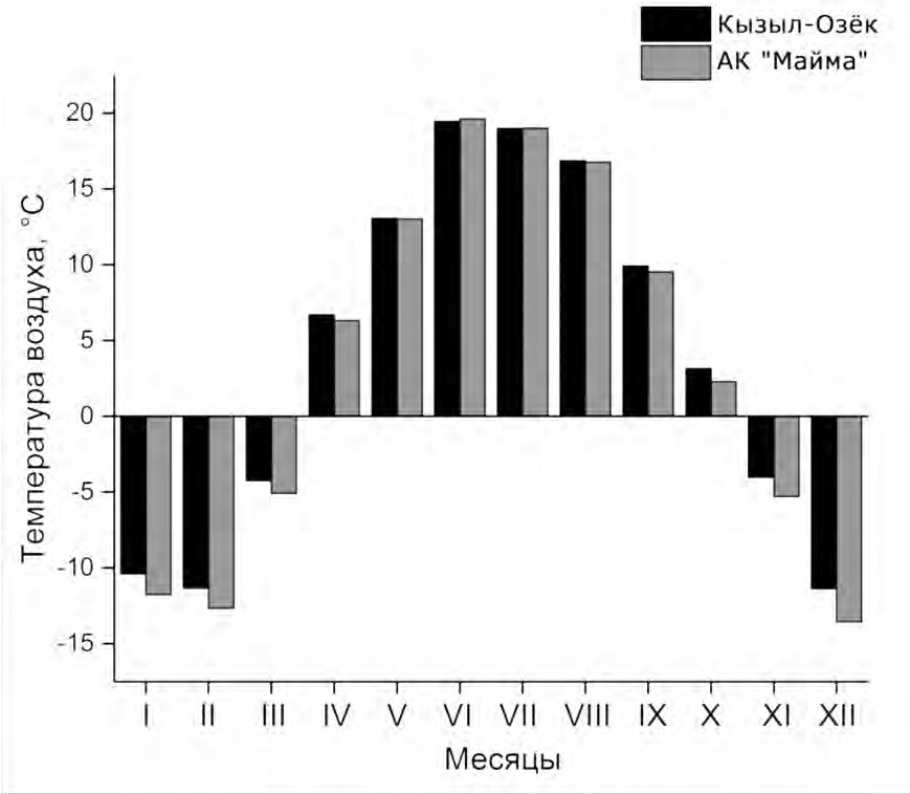



Рисунок 3.6 – Средняя месячная температура воздуха в 2017 г. по данным метеостанции Кызыл-Озёк и АК «Майма»

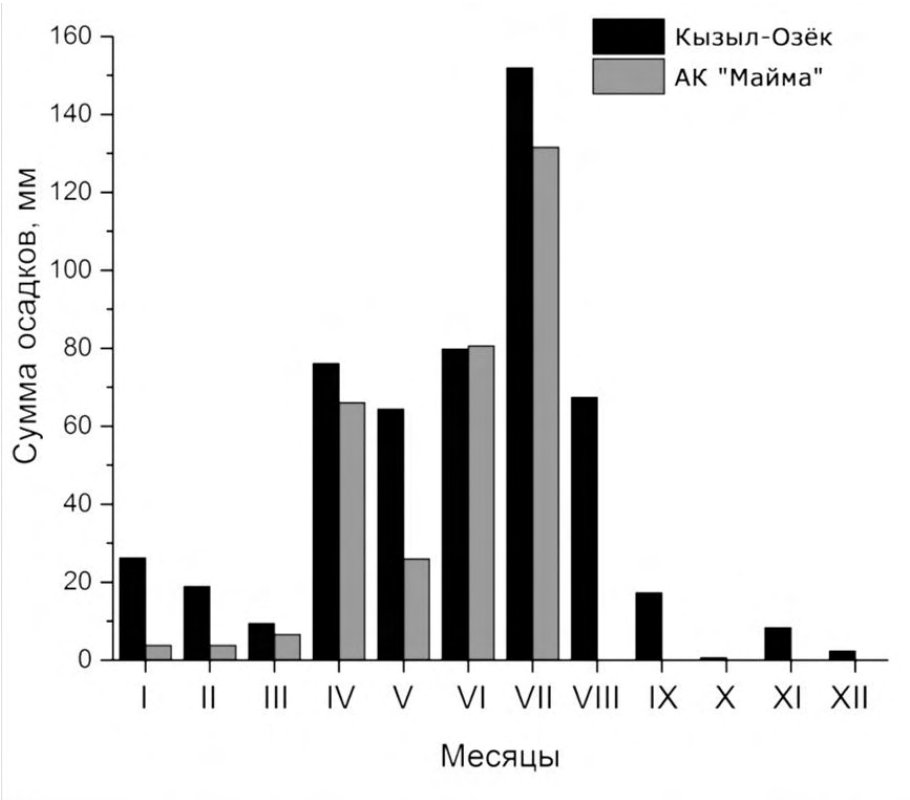



Рисунок 3.7 – Суммарные за месяц значения осадков в 2017 г. по данным метеостанции Кызыл-Озёк и АК «Майма»

На Рисунке 3.8 показаны интервалы ошибок определения среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО) исследуемых рядов. Видно, что разница в измерениях температуры воздуха и количества осадков по двум источникам, представленная в Таблице 3.2, близка к ошибке определения среднего значения, что свидетельствует о возможно незначимом различии между рядами параметров. Несмотря на различия в абсолютных величинах средних значений уровней воды ошибки их средних и интервалы СКО так же близки по величине.

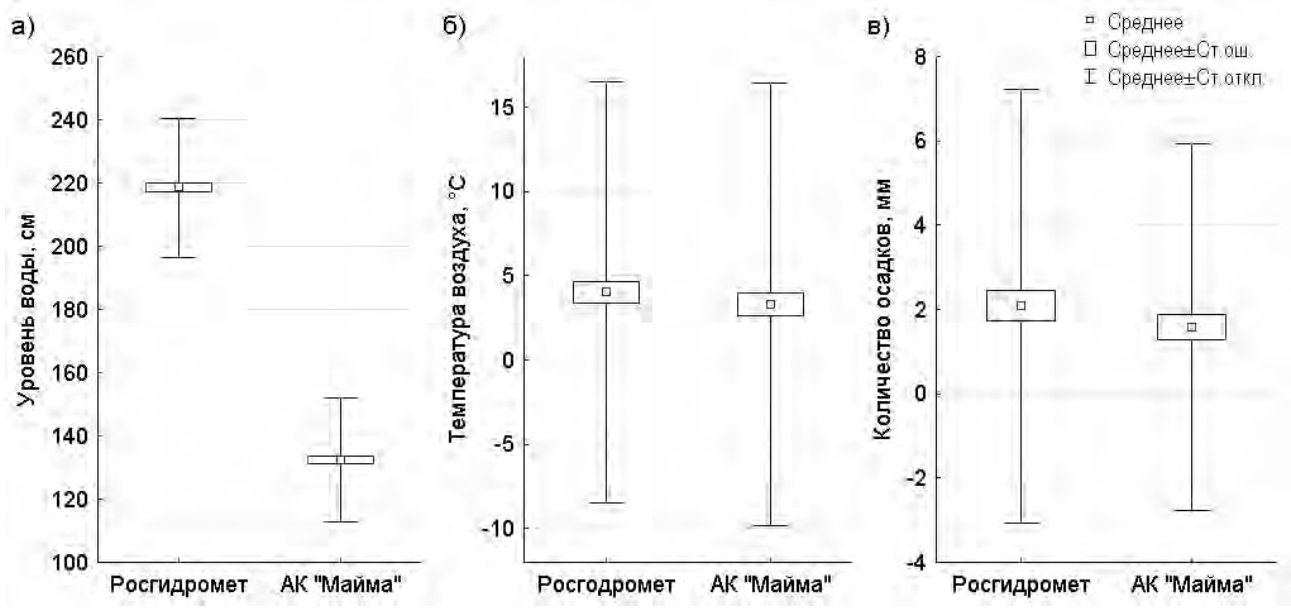



Рисунок 3.8 – Диаграммы размаха а) уровней воды; б) температуры воздуха; в) количества осадков по данным станций Росгидромета и АК «Майма»

Таблица 3.3 – Значимость связи и различий исследуемых рядов

| Параметр | Критерий знаков ($p < 0,05$) | Критерий Вилкоксона ($p < 0,05$) | Коэффициент корреляции ($p < 0,01$) |
|---|---|---|---|
| Уровень воды, см | - | - | 0,92 |
| Температура воздуха, °C | 8,62 (различия значимы) | 9,84 (различия значимы) | 0,99 |
| Количество осадков, мм | 1,44 (различия не значимы) | 2,86 (различия значимы) | 0,71 |

В практике гидрометеорологических расчетов для проверки однородности рядов широко используются статистические критерии сравнения переменных. В случае двух выборок с помощью критериев сравнения можно определить

значимость различий между ними. Проверка исследуемых рядов по критерию Колмогорова-Смирнова показала, что распределение переменных не является нормальным, что свидетельствует о необходимости использования методов непараметрической статистики. В случае зависимых выборок удобно воспользоваться критерием знаков (проверяется гипотеза о равенстве медианы разности двух выборок нулю) и критерием Вилкоксона (проверяется гипотеза о том, что существенность сдвигов в типичном направлении не превосходит существенности сдвигов в нетипичном направлении). Такой подход может быть применен для оценки значимости различий рядов ежедневных наблюдений температуры воздуха и количества осадков по данным АК «Майма» и Росгидромета. В случае с уровнями воды, при различных абсолютных значениях в измерительных точках зависимость между рядами синхронных наблюдений можно оценить, воспользовавшись коэффициентом линейной корреляции. Таким образом, для трех пар рассматриваемых выборок были получены статистические показатели, характеризующие значимость их связи и различий (таблица 3.3) [Зуев и др., 2018].

В результате расчета критериев сравнения, можно заключить, что различия между рядами температуры воздуха АК «Майма» и Росгидромета являются достоверными с доверительной вероятностью 0,95, коэффициент корреляции между рядами при этом близок к единице, что свидетельствует о наличии очень сильной связи. Как видно на Рисунке 3.6, в холодный период года на метеостанции, расположенной в черте с. Кызыл-Озёк, наблюдаются более высокие температуры воздуха, чем на расположенном в окрестностях села АК «Майма». Это может быть связано с тем, что в пределах с. Кызыл-Озёк в холодный период года воздух прогревается в результате сжигания топлива и работы отопительных систем. Этим же фактом объясняется разница средних годовых значений температуры воздуха и соответствующая значимость различий между рядами, установленная по критериям сравнения [Зуев и др., 2018].

Для рядов количества осадков достоверность различий была подтверждена лишь критерием Вилкоксона, в соответствии с критерием знаков различия между рядами можно считать незначимыми с доверительной вероятностью 0,95. Коэффициент корреляции в случае с осадками оказался ниже, чем коэффициент корреляции рядов температуры воздуха, тем не менее, его величина указывает на существование сильной связи между рядами наблюдений. Более низкое значение коэффициента корреляции в данном случае может быть обусловлено пространственными вариациями в ежедневном распределении осадков.

Очень сильная корреляционная связь установлена так же между рядами наблюдений уровней воды по данным Росгидромета и АК «Майма». Несмотря на значительную разницу абсолютных величин, близкий к единице коэффициент корреляции между рядами обусловлен единым генезисом формирования стока и, как следствие, одинаковой динамикой изменения параметров [Зуев и др., 2018].

В результате проделанного сравнительного анализа можно заключить, что гидрометеорологическая информация, получаемая с помощью АК «Майма», является репрезентативной и согласуется с официальными данными Росгидромета. Несмотря на значимость различий температурных данных на метеостанции в с. Кызыл-Озёк и АК «Майма», обусловленных антропогенным фактором в зимний период, коэффициент корреляции (r = 0,99) свидетельствует об очень сильной связи между параметрами. Пространственные вариации в распределении осадков ослабляют корреляционную связь между рядами ежедневного количества осадков (r = 0,71), однако, в соответствии с критерием знаков наблюдаемые различия являются статистически незначимыми с доверительной вероятностью 0,95. Очень сильная корреляционная связь (r = 0,92) и одинаковая динамика изменения уровней воды по данным гидропоста в с. Майма и АК «Майма» свидетельствует о высокой точности измерения уровня воды датчиком АК «Майма». Однако стоит отметить, что для задач прогнозирования уровня воды необходимо осуществить высотную привязку измерительного датчика к реперному пункту Государственной геодезической сети [Зуев и др., 2018].

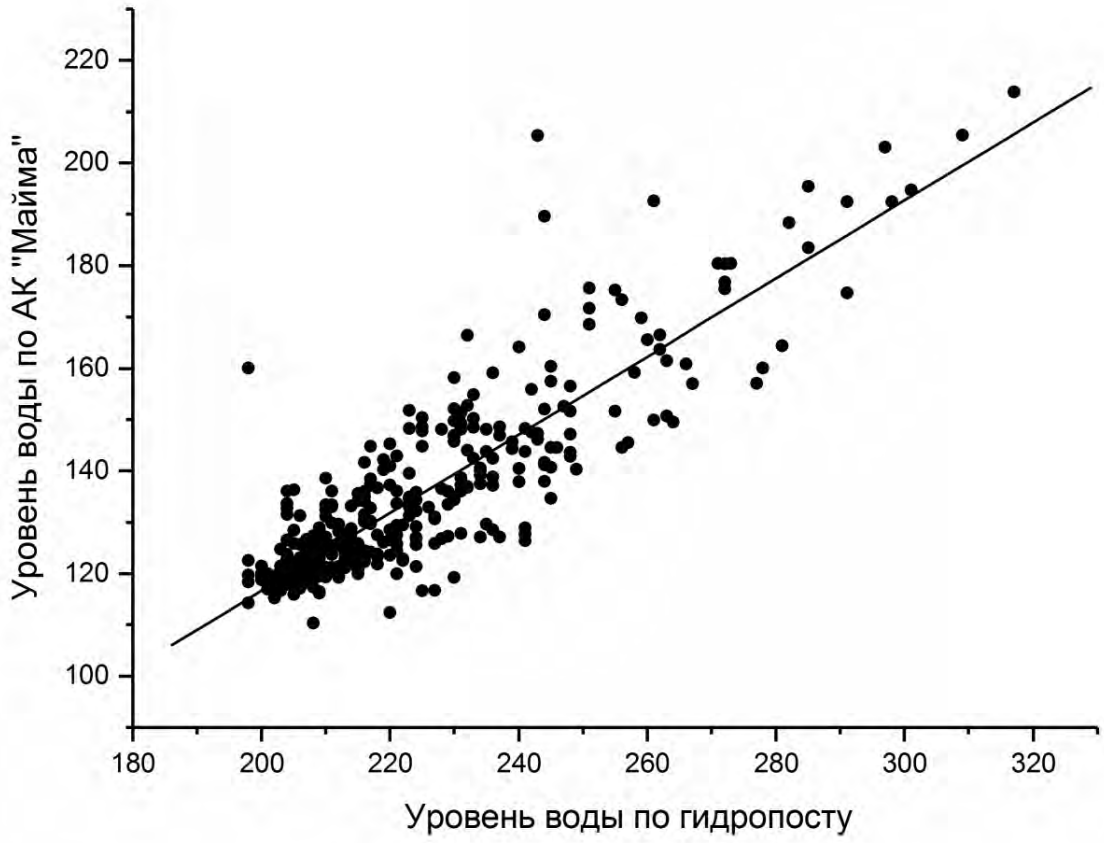
## 3.3. Комплексная оценка гидрометеорологических характеристик половодья в 2016, 2017 и 2018 годах

На водосборных бассейнах с потенциально высокой паводковой опасностью [Робертус, 2014; Семенов, 2014; Харламова и др., 2015] необходимо создание сети станций и постов для проведения планомерных гидрометеорологических исследований [Природные комплексы…, 2006]. Также важна организация дополнительной сети оперативного мониторинга состояния окружающей среды, что позволило бы предсказать развитие чрезвычайной ситуации и своевременно принять меры к уменьшению ущерба региону [Sunkpho et al., 2011; Kouwen, 1988; Зуев и др., 2020б].

Достоверно установлено, что гидрометеорологическая информация, получаемая с АК «Майма», является репрезентативной и соответствует официальным данным Росгидромета [Зуев и др., 2018]. Также [Киселев и др., 2018; Kiselev et al., 2018] были проведены исследования, которые подтвердили возможность применения данного АК для исследования температурного режима в разных ландшафтах на основе сравнения измерений температуры почвы с использованием АК и измерений по вытяжным глубиннопочвенным термометрам. Чтобы определить основные факторы, при которых в бассейне р. Майма во время половодья возможно развитие экстремальных ситуаций, были проанализированы данные измерений автономного комплекса «Майма» в совокупности с данными Росгидромета [Зуев и др., 2020а; Зуев и др., 2020б]. Для исследования использовались следующие источники (расположение точек наблюдения представлены на рисунке 3.3):

- данные об уровне воды (гидропост в с. Майма);
- данные о температуре воздуха (метеостанция в с. Кызыл-Озёк, сервис ВНИИГМИ-МЦД [ВНИИГМИ-МЦД]);
- высота снежного покрова (пункты наблюдения № 1 (с. Урлу-Аспак) и № 3 (с. Кызыл-Озёк) АК «Майма»);

- температура почвы на глубину до 40 см (пункты наблюдения № 1 (с. Урлу-Аспак) и № 3 (с. Кызыл-Озёк) АК «Майма»);
- температура воздуха (пункт наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) АК «Майма»);
- количество жидких осадков (пункт наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) АК «Майма»);
- уровень воды (пункт наблюдения № 2 (пос. Филиал) АК «Майма»);
- температура воды (пункт наблюдения № 2 (пос. Филиал) АК «Майма»).




- Рисунок 3.9 – Диаграмма рассеяния и прямая регрессии средних суточных значений уровня воды в реке Майма (п. № 2 (пос. Филиал) и гидропосту в с. Майма)

Имеющиеся пробелы в средней суточной температуре воздуха, связанные со сбоем программного обеспечения АК «Майма», были дополнены данными Росгидромета с 1 ноября по 5 декабря 2015 г. и с 5 января по 14 февраля 2016 г. на основании высокой корреляции между ними (r = 0,99) [Зуев и др., 2018]. Также в связи с отсутствием весной 2016 г. в системе АК «Майма» части данных об

измерениях уровня воды, для анализа динамики половодья были использованы данные по гидропосту в с. Майма [Зуев и др., 2018]. На Рисунке 3.9 приведены диаграмма рассеяния и прямая регрессии средних суточных значений уровня воды в реке Майма по АК «Майма» в пункте наблюдения № 2 (пос. Филиал) и по данным гидропоста в с. Майма за период 10.07.2016–1.06.2018. Высокий коэффициент линейной корреляции ($r = 0,89$ при выборке $N = 439$) свидетельствует об идентичности развития событий в данных пунктах наблюдений во время половодья 2016 г., позволяя установить дату начала формирования и длительность первого пика, а также, среднюю скорость подъема воды в реке [Зуев и др., 2020а].

На основе всех имеющихся данных были построены Таблицы 3.4 и 3.5, которые отражают гидрометеорологическую обстановку региона в холодный (ноябрь–март) период и в период половодья с 2015 по 2018 гг. Добавление предстоящего холодному периоду месяца и следующего после было необходимо для отслеживания наступления устойчивого снежного покрова (октябрь) и спада первых пиков половодья (до 20 апреля) [Зуев и др., 2020а; Зуев и др., 2020б].

В Таблице 3.4 описана влажность почвы и ее температурный режим (промерзание), видны даты установления устойчивого снежного покрова с сопровождающимся количеством жидких осадков, дано описание интенсивности снеготаяния. В Таблице 3.5 детально разобран период половодья, даты его наступления, продолжительность, интенсивность, количество осадков и максимальный уровень первого пика половодья.

На Рисунке 3.10 представлены временные ряды средних суточных температур воздуха за период наблюдений в сравнении с многолетним средним, рассчитанным по данным с 1940 по 2018 гг. [ВНИИГМИ-МЦД]. Такое представление результатов позволяет выявить своеобразие температурного режима каждого холодного периода за время наблюдений с 2015–2018 гг.

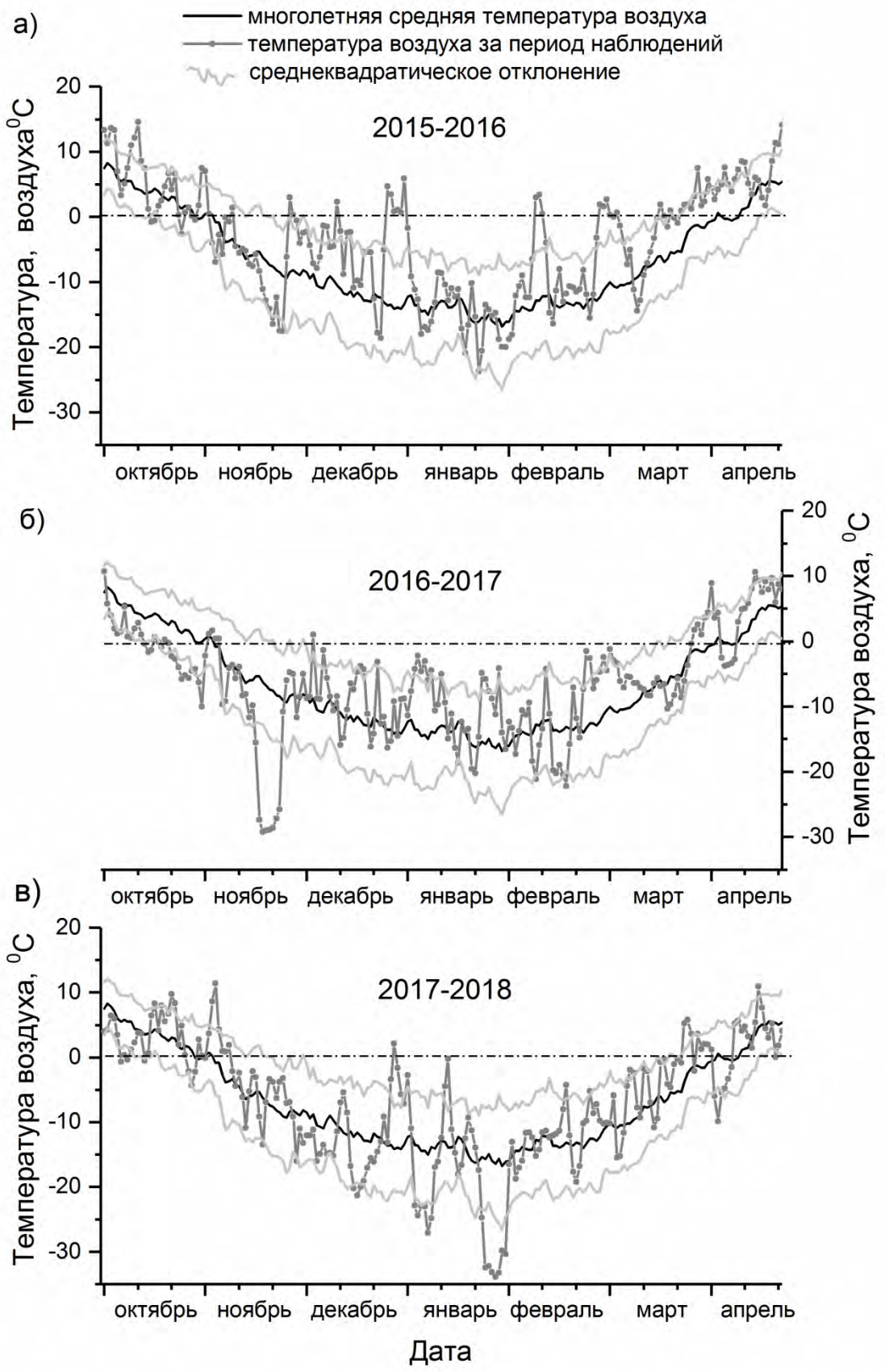



Рисунок 3.10 – Временные ряды средних суточных температур за период наблюдений с 1 октября по 20 апреля 2015–2018 гг. в сравнении с многолетним средним для метеостанции в с. Кызыл-Озёк: а) 2015–2016 гг.; б) 2016–2017 гг.; в) 2017–2018 гг

Таблица 3.4 – Гидрометеорологические условия в бассейне р. Майма с октября по апрель 2015–2016, 2016–2017, 2017–2018 гг.

| Показатели | Период наблюдений | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 01.10.2015 –20.04.2016 | | 01.10.2016 –20.04.2017 | | 01.10.2017 –20.04.2018 | |
| | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) |
| Дата установления устойчивого снежного покрова | 1 ноября | 1 ноября | 13 октября | 13 октября | 8 ноября | 8 ноября |
| Количество жидких осадков с 1.10 до установления устойчивого снежного покрова | 70 мм | 56 мм | 59 мм | 79 мм | 51 мм | 45 мм |
| Влажность почвы на глубине 10 см<br>а) к началу установления постоянного снежного покрова<br>б) к началу интенсивного снеготаяния | а) ~ 43 % (данные на 31.10.);<br>б) ~19 % | нет данных | а) ~ 43 %;<br>б) ~ 42 % | нет данных | а) ~ 43 %;<br>б) ~ 22 % | нет данных |
| Максимальная глубина промерзания почвы | до 40 см | до 30 см | почва не промерзала<br>$t_{min}$ на поверхности почвы ~ 0 °С | | возможно >40 см | до 40 см |
| Высота снежного покрова к началу интенсивного снеготаяния | 30 см | 45 см | 65 см | 35 см | 53 см | 55 см |
| Период интенсивного снеготаяния | 13.03 – 25.03 (13 сут.) | 13.03 – 1.04 (20 сут.) | 24.03 – 03.04 (10 сут.) | 24.03 – 31.03 (7 сут.) | 15.03 – 29 03 (14 сут.) | 15.03 – 29 03 (14 сут.) |
| Средняя температура воздуха в период весеннего снеготаяния | 1,4 °С | 1,8 °С | 3,3 °С | 4 °С | 0,7 °С | 1,7 °С |
| Средняя скорость стаивания снежного покрова | 2,3 см/сут. | 2,2 см/сут. | 6,5 см/сут. | 5 см/сут. | 3,5 см/сут. | 3,7 см/сут. |
| Количество жидких осадков за период весеннего снеготаяния | 8 мм | 12 мм | 6 мм | 3 мм | 34 мм | 27 мм |

Таблица 3.5 – Гидрометеорологические условия в бассейне р. Майма в период начала половодья 2016, 2017, 2018 гг.

| Показатели | Период наблюдений | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 01.03.–20.04.2016 | | 01.03.–20.04.2017 | | 01.03.–20.04.2018 | |
| | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) | № 3 (с. Кызыл-Озёк) | № 1 (с. Урлу-Аспак) |
| Временной интервал формирования первого пика паводка (по средним суточным данным):<br>а) по данным АК «Майма»<br>б) по данным гидропоста | а) нет данных;<br>б) 22.03 – 4.04<br>(13 сут.) | нет данных | а) 28.03 – 31.03<br>(3 сут.);<br>б) 26.03 – 31.05<br>(5 сут.) | нет данных | а) 22.03 –24.03<br>(2 сут.);<br>б) с 23.03<br>(нет данных<br>за 25.03) | нет данных |
| Экстремальное количество жидких осадков в период прохождения паводка | 12.04 и 13.04<br>Σ=46 мм | 12.04 и 13.04<br>Σ=28 мм | 18.04<br>36 мм | 18.04 и 19.04<br>Σ=32 мм | – | – |
| Скорость подъема уровня реки первого пика половодья:<br>а) по данным АК «Майма»<br>б) по данным гидропоста | а) нет данных;<br>б) 6,7 см/сут. | нет данных | а) 15,4 см/сут.;<br>б) 13,4 см/сут. | нет данных | а) 43,5 см/сут.;<br>б) 45 см/сут.<br>(данные за<br>первые сутки) | нет данных |
| Максимальный уровень первого пика:<br>(по средним суточным данным)<br>а) по данным АК «Майма»<br>б) по данным гидропоста | а) нет данных;<br>б) 286 см | нет данных | а) 177 см;<br>б) 272 см | нет данных | а) 205 см;<br>б) 243 см в<br>первые сутки | нет данных |
| Временной интервал прохождения первого пика паводка | а) нет данных;<br>б) 22.03 – 8.04<br>(17 сут.) | нет данных | а) 28.03 – 7.04<br>(10 сут.);<br>б) 26.03 – 7.04<br>(12 сут.) | нет данных | а) 22.03 – 3.04<br>(13 сут.);<br>б) 23.03 – 5.04<br>(14 сут.) | нет данных |

На Рисунках 3.11, 3.14, 3.18 приведены временные ряды средних суточных значений параметров, отражающих динамику гидрометеорологической обстановки в двух пунктах наблюдений: № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак). Уровень воды для периода с 2015–2016 гг. взят с гидрологических ежегодников по гидрологическому посту в с. Майма. Для периодов 2016–2017 гг. и 2017–2018 гг. – по пункту наблюдения № 2 (пос. Филиал). Большое количество пунктов наблюдений, расположенных в разных частях водосборного бассейна реки дает детальный анализ, который позволит описать гидрометеорологическую обстановку в любой период времени [Зуев и др., 2020а].

Все три периода наблюдений (половодье 2016, 2017 и 2018 гг.) существенно отличались по количеству жидких осадков, выпавших с 1 октября до даты установления постоянного снежного покрова (таблица 3.4), однако существенного влияния на состояние почвы это не оказало. Дальнейший температурный режим почвы и ее влагосодержание определялись высотой снежного покрова и температурой воздуха. На фоне естественного отрицательного тренда температуры верхних слоев почвы в течение зимнего периода явно проявлялись ситуативные особенности внешних погодных условий (рисунок 3.11, 3.14, 3.18).

### 3.3.1. Формирование половодья 2016 года

Для осени и зимы 2015–2016 гг. характерны значительные резкие изменения температурного режима (таблица 3.4). На Рисунке 3.10(а) явно видно, что в периоды потеплений в декабре, в первой и третей декаде февраля средние суточные температуры воздуха существенно превышают верхнюю границу интервала среднеквадратичного отклонения (СКО) многолетнего среднего. Самым холодным месяцем календарной зимы стал январь, (рисунок 3.10(а), 3.11, таблица 3.4). В течение двух недель, с 15 по 30 января, регистрировались температуры ниже –24 ºС [Погода и климат]. При невысоком уровне снега в 30 см в пункте № 3 (с. Кызыл-Озёк) и 35 см в пункте № 1 (с. Урлу-Аспак) (рисунок 3.11) постепенно происходило промерзание почвы. К 1 февраля отрицательные температуры регистрировались на глубину до 40 и 30 см (таблица 3.4) в № 3 и

№ 1 соответственно. Переход температуры почвы через 0 ºС сопровождается замерзанием влаги, накопленной в почве. К началу февраля 2016 г. в пункте № 3 влажность почвы на глубине 10 см составляла всего около 14 % (рисунок 3.11). Во время оттепелей регистрировалось повышение температуры почвы и синхронный рост влажности до 24 % на глубине 10 см (рисунок 3.11) [Зуев и др., 2020б].

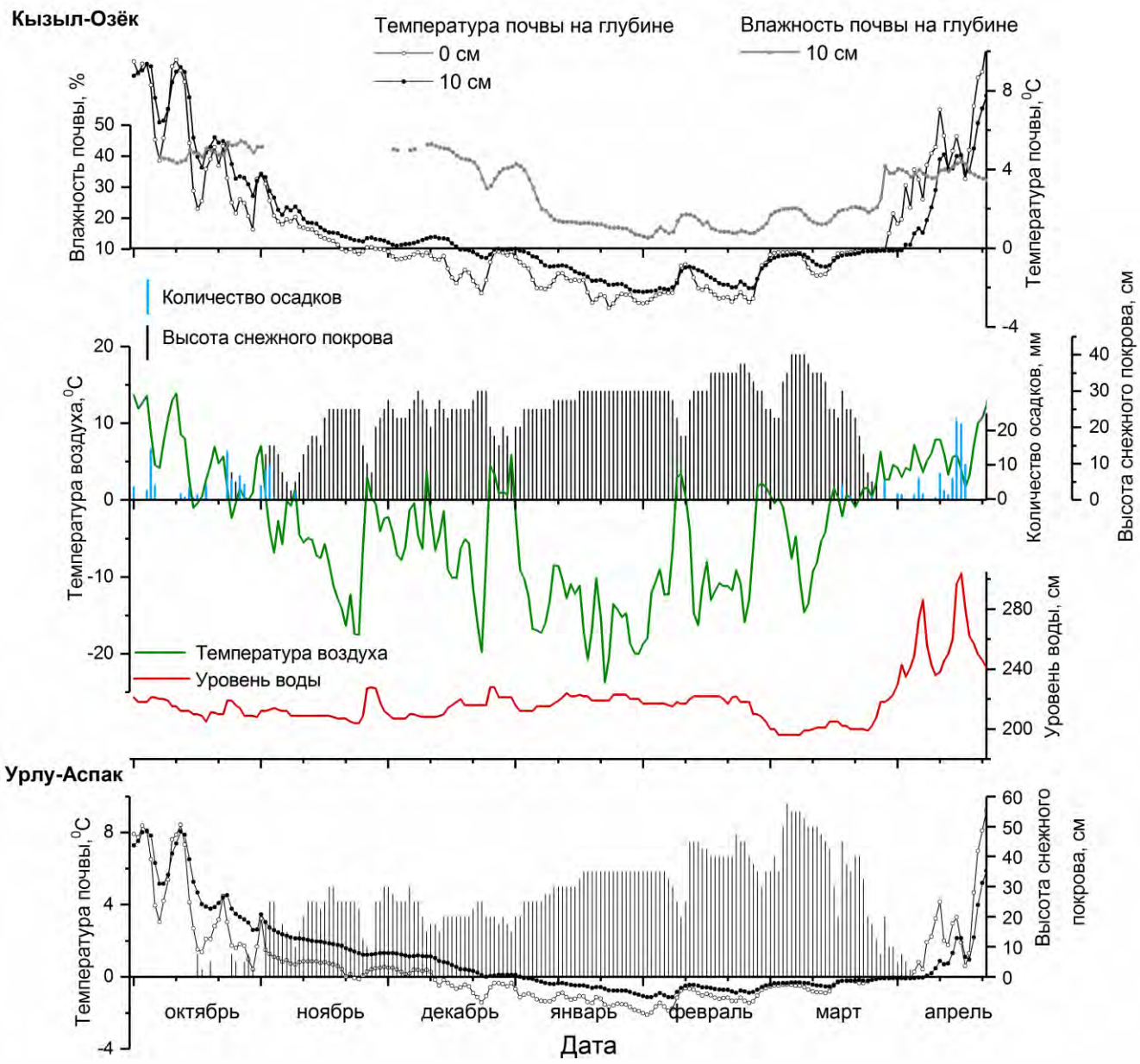



Рисунок 3.11 – Комплексный график данных в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) с 1 октября по 20 апреля 2015–2016 гг.

Данные, представленные на Рисунке 3.12, в Таблицах 3.4 и 3.5 позволяют оценить гидрометеорологическую обстановку в бассейне реки Майма в период

половодья 2016 г. Очевидно, что сроки схода снежного покрова и скорость снеготаяния, прежде всего, определялись температурным режимом воздуха. Хотя температуры марта–апреля оставались в пределах СКО (рисунок 3.10(а)), в течение всех трех лет наблюдений в первой декаде марта регистрировалось похолодание [Зуев и др., 2020б].

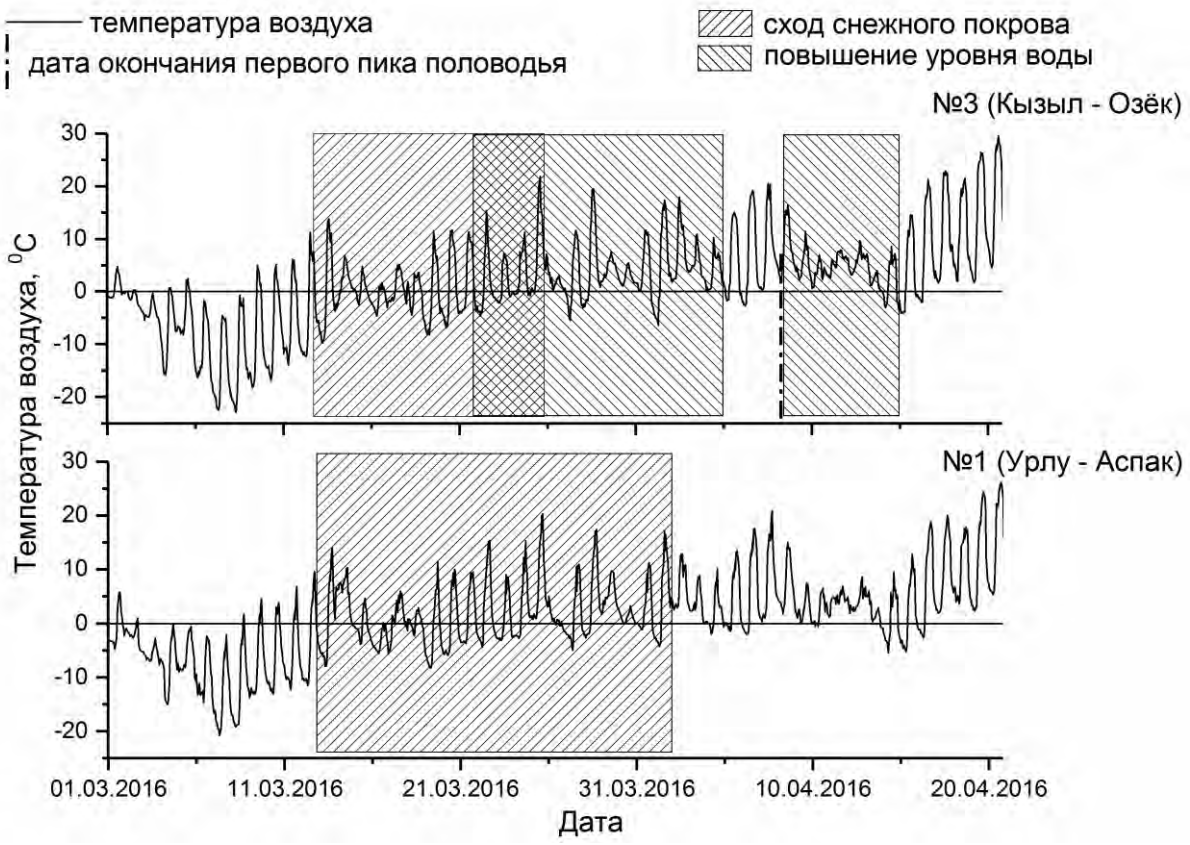



Рисунок 3.12 – Временные ряды почасовых значений температуры воздуха в марте – апреле 2016 г. на двух пунктах наблюдений: № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак)

Наиболее явно характер погоды проявляется в динамике временных рядов почасовых значений температуры воздуха (рисунок 3.12). Сложившиеся погодные условия способствовали выпадению значительного количества твердых осадков и, как следствие, повышению высоты снежного покрова (рисунок 3.11).

На Рисунке 3.12 показаны интервалы формирования максимумов уровня воды и продолжительность первого пика половодья за период наблюдений. Детализировать развитие половодья позволяют данные, графически представленные на Рисунке 3.13. Из него видно, что подъем воды в реке

осуществлялся в течение 13 суток, и скорость формирования первого пика стала самой низкой за 3 года наблюдений (таблица 3.5). Жидкие осадки во время половодья также были распределены неравномерно. Регулярное выпадение не более 10 мм/сут. регистрировалось в пункте № 1. Однако основным фактором, предопределившим формирование второго пика, стало выпадение жидких осадков 12–13 апреля. В этот период в пункте № 3 было зарегистрировано 24 и 22 мм жидких осадков соответственно (рисунок 3.13). Данные об уровне воды в точках экстремумов также приведены на Рисунке 3.13 [Зуев и др., 2020б].

Первый пик паводка весной 2016 года начал формироваться через 9 суток от начала периода активного снеготаяния (таблица 3.4, таблица 3.5, рисунок 3.12). Кроме того, по данным АК «Майма», сход снега на исследуемой территории был неравномерным: в пункте наблюдения № 1 он завершился на 7 суток позднее, чем в пункте № 3 [Зуев и др., 2020б].

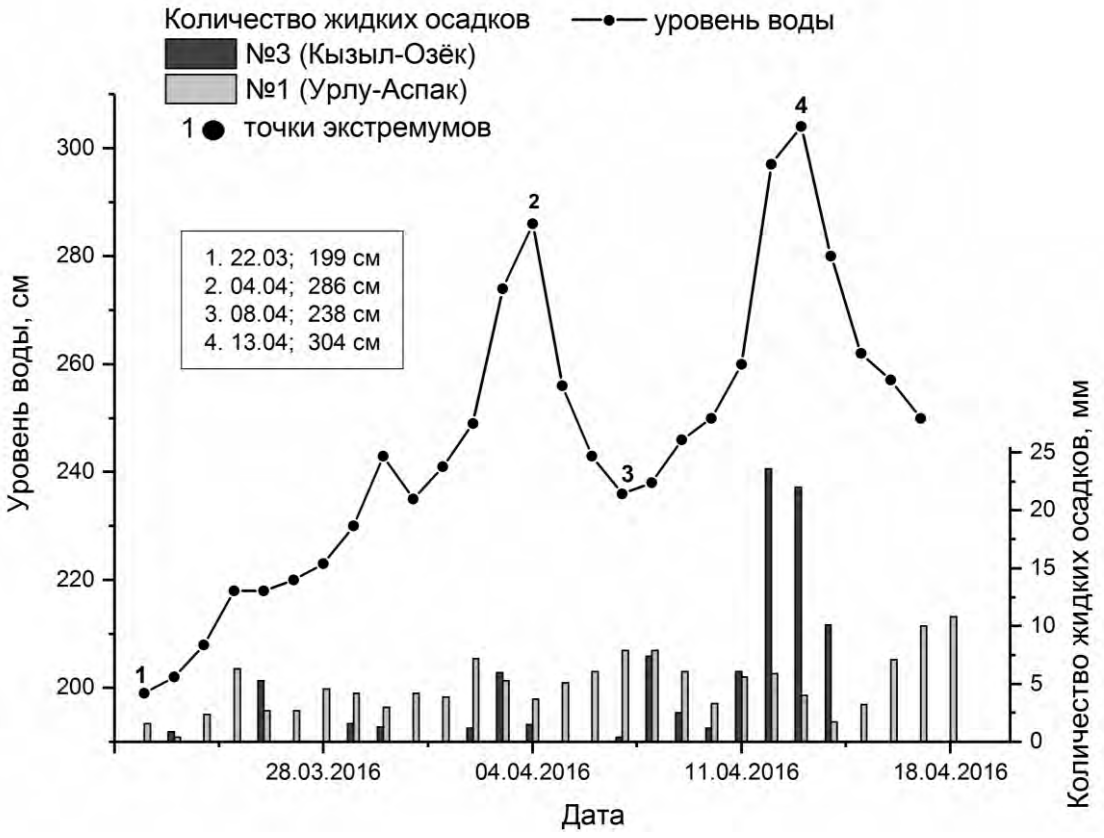



Рисунок 3.13 – Средние суточные значения уровня воды в реке и количества жидких осадков в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) в период начала половодья 2016 г. (уровень воды - гидропост с. Майма)

### 3.3.2. Формирование половодья 2017 года

Рассматривая сроки установления устойчивого снежного покрова, необходимо отметить ранний переход на зимний режим погоды осенью 2016 г., что связано с аномально низкими для этого периода температурами воздуха в октябре [МПРиЭРА, 2017] (рисунок 3.10(б), 3.14). Очевидно, что во второй декаде октября 2016 года даже в дневные часы температура воздуха не превышала +6 °С, а с 23 октября стабильно была ниже 0 °С. Такие погодные условия способствовали выпадению осадков в виде снега и раннему установлению устойчивого снежного покрова (таблица 3.5, рисунок 3.14) [Зуев и др., 2020а].

Период 1 октября 2016 – 20 апреля 2017 гг., прежде всего, характеризуется аномально низкими средними суточными температурами ноября (рисунок 3.10(б), 3.14, таблица 3.4). Анализ почасовых температур показал, что в пункте № 3 с 16 по 22 ноября включительно в ночные и утренние часы были зарегистрированы температуры до –33,6 °С, днем в этот период температура фактически не поднимались выше –20 °С, при этом средние суточные температуры оказались за пределами нижней границы интервала ±2СКО. Однако большое количество снега, выпавшего в первой половине месяца, препятствовало замерзанию почвы. К 15 ноября в пунктах наблюдений уровень снега достигал 45 см (рисунок 3.14). Таким образом, похолодание 16–22 ноября привело лишь к незначительному постепенному понижению температуры в глубину до 50 см в пункте № 3 и до 40 см в пункте № 1. В пункте № 3 в этот период было зафиксировано понижение влажности почвы на глубине 10 см до 36,8 % [Зуев и др., 2020а]. Анализ показал, что в целом с декабря по февраль значения средних суточных температур воздуха были выше многолетнего среднего, но фактически оставались в пределах верхней границы СКО (рисунок 3.10(б)). Однако в дневные часы температуры воздуха могли существенно превышать среднюю климатическую норму. Так, при потеплении в третьей декаде февраля в пункте № 3 (с. Кызыл-Озёк) в дневные часы воздух прогревался до +12,5 °С (рисунок 3.14). Периоды похолоданий были непродолжительными, а температуры

незначительно опускались ниже многолетнего среднего, за исключением похолоданий с 11 по 15 февраля, включительно (рисунок 3.10(б), таблица 3.4). В пункте № 3 в эти дни были зарегистрированы средние суточные температуры до –22 °С (рисунок 3.10(б), 3.14), а в утренние часы температура воздуха понижалась до –27, –29 °С. Однако на состояние почвы подобные колебания значимого влияния не оказали. В течение календарной зимы, на фоне слабовыраженного отрицательного тренда, температуры почвы оставались выше 0 °С, а влажность в периоды значительных похолоданий понижалась лишь на 1 % [Зуев и др., 2020а].

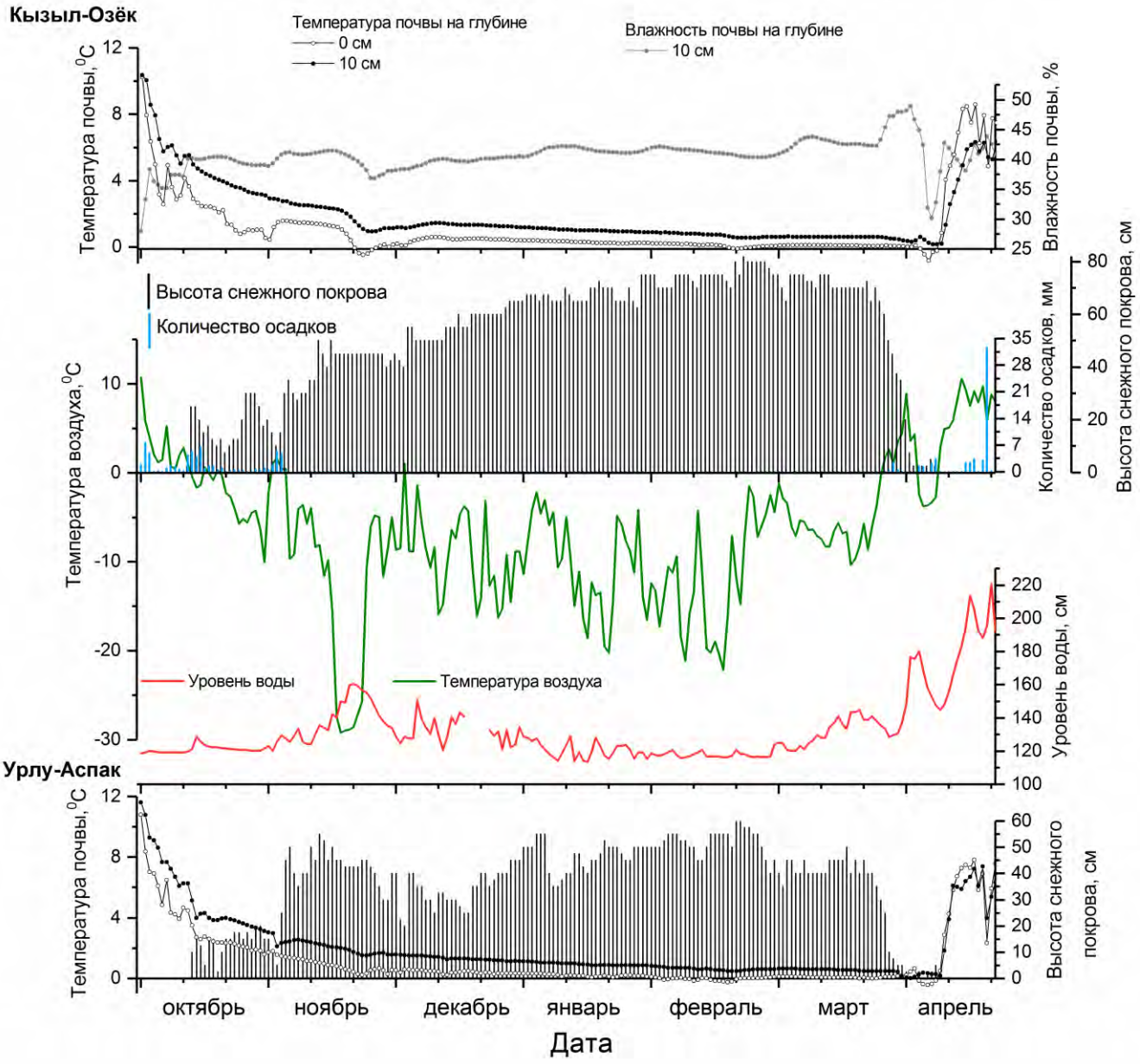



Рисунок 3.14 – Комплексный график данных в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) с 1 октября по 20 апреля 2016–2017 гг.

Кроме температурного режима, фактором, сдерживающим процесс замерзания почвы в зимний период 2016–2017 гг., стало большое количество регулярных осадков в виде снега (рисунок 3.14). Эти данные подтверждаются авторами Л. Ф. Лубенец с соавт. [2017б], Ю. В. Робертус с соавт. [2017]. Уже к концу декабря высота снежного покрова в пункте № 3 достигала 60 см и 50 см в пункте № 1. Такое различие, прежде обусловлено более высокой средней сезонной температурой воздуха в пункте № 1. В среднем, в течение календарной зимы температура воздуха была на 2 °С, а в периоды оттепелей практически на 3 °С выше, чем в пункте № 3. Поэтому накопление снега в бассейне реки происходило неравномерно: существенное влияние на высоту снежного покрова оказывали оттепели. Наиболее явно их влияние проявилось в пункте наблюдения № 1 в первой половине марта 2017 г. (рисунок 3.14, 3.15). К началу снеготаяния высота снежного покрова здесь была почти в 2 раза ниже, чем в пункте наблюдения № 3. Как следствие, оседание снега во время оттепелей в пункте № 1 было более выраженным [Зуев и др., 2020а].

Весной 2017 г. при фактически безморозном периоде с 24 марта по 1 апреля и повышении дневных температур в среднем до 12,7 °С в пункте № 3 и 14,9 °С в пункте № 1, соответственно, сход снега произошел в достаточно сжатые сроки (таблица 3.5), хотя к началу снеготаяния в пункте № 3 был зарегистрирован самый высокий за период наблюдений уровень снега.

Метеорологические условия, сложившиеся в регионе со 2 по 22 марта (рисунок 3.16) способствовали регулярному выпадению твердых осадков. К концу второй декады месяца средние суточные температуры воздуха опускались до –10 °С (рисунок 3.10(б), 3.14). Процесс снеготаяния начался только в середине третьей декады марта с повышением дневных температур в среднем выше 10 °С [Зуев и др., 2020а].

Рисунок 3.15 – Временные ряды почасовых значений температуры воздуха в марте – апреле 2017 г. в двух пунктах наблюдений: № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак)

Резкое потепление до температур, превышающих верхний предел СКО многолетнего среднего (рисунок 3.10(б)), стало причиной быстрого развития паводка всего через двое суток от начала интенсивного снеготаяния. Как по данным гидропоста, так и по данным АК «Майма» первый пик сформировался в течение 5 суток (таблица 3.5, рисунок 3.15, 3.16). Понижение уровня воды началось через 3 суток, а значительное похолодание в первой декаде апреля способствовало спаду уровня фактически до исходных значений. Изменение температурного режима стало причиной выпадения большого количества твердых осадков (рисунок 3.14, 3.16). Формирование второго пика половодья произошло при установившейся теплой погоды с 7 апреля со средними суточными температурами в пределах верхней границы СКО многолетнего среднего (рисунок 3.10(б), 3.15). Продолжительность подъема составила 7 суток. На

формирование максимума могло оказать влияние жидких осадков на территории бассейна реки: по данным АК «Майма» 13 апреля в пункте № 1 было зарегистрировано выпадение около 20 мм жидких осадков. Третий максимум уровня воды 19 апреля вызван именно выпадением на территории бассейна реки большого количества жидких осадков. По данным [МПРиЭРА, 2018] 18 апреля на метеостанции в с. Кызыл-Озек зарегистрировано выпадение 33 мм осадков, по данным АК «Майма» 18 апреля в пункте № 3 выпало 32 мм осадков, в пункте № 1 – такое же в сумме количество осадков выпало за два дня 18–19 апреля. То есть, это событие можно рассматривать как моментальный дождевой паводок.

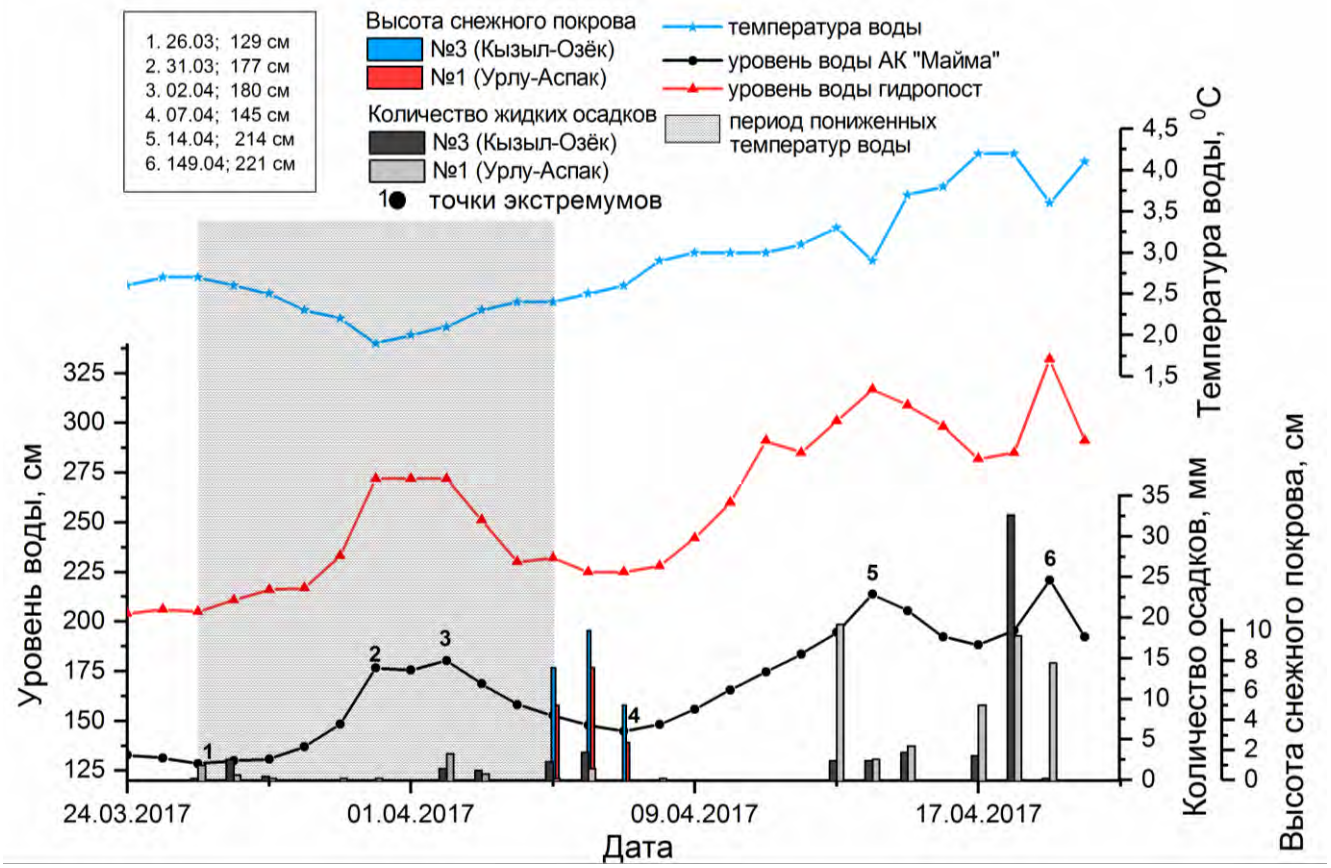



Рисунок 3.16 – Средние суточные значения уровня воды в реке, количества жидких осадков и высоты снежного покрова в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) в период начала половодья 2017 г.

Анализ почасовых данных об уровне воды в пункте наблюдения № 2 АК «Майма» (рисунок 3.17) показал, что за 17 часов (с 13:00 18.04 до 06:00 19.04) уровень воды в реке Майма в районе п. № 2 поднялся на 63 см, достигнув отметки

244 см. По средним суточным данным в створе реки уровень над нулем гидрологического поста поднялся до 332 см. В условиях быстрого, в течение нескольких часов, подъема воды, средние суточные данные не позволяют объективно оценить ситуацию. Так, 19 апреля среднее суточное значение уровня воды, рассчитанное по показаниям АК «Майма», оказалось на 23 см ниже зарегистрированного максимального уровня (рисунок 3.16, 3.17). По оценке Доклада Министерства природных ресурсов, экологии и имущественных отношений Республики Алтай [МПРиЭРА, 2018] дождевой паводок 19 апреля 2017 г. относится к чрезвычайным ситуациям природного характера [Зуев и др., 2020а].

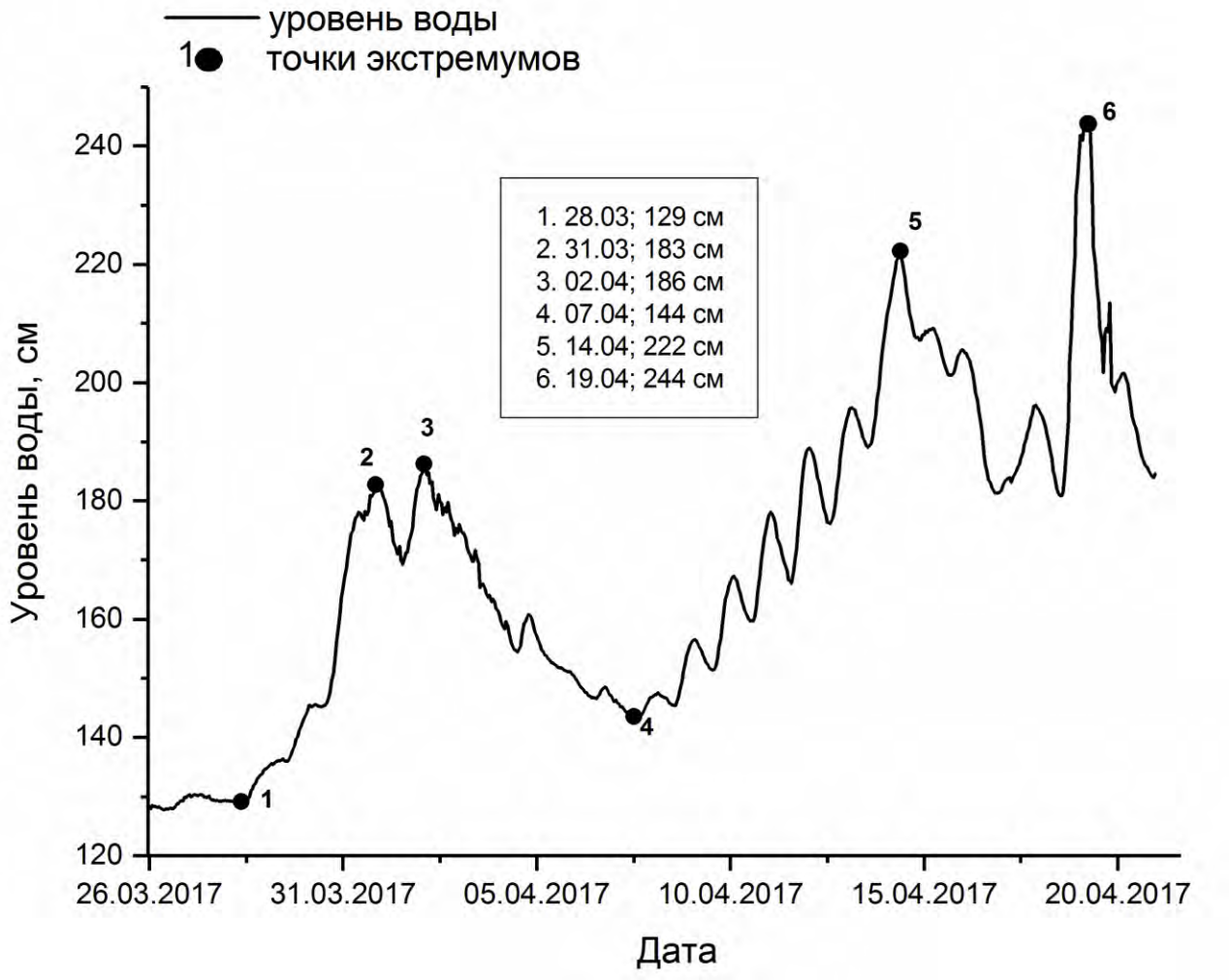



Рисунок 3.17 – Ряды почасовых значений уровня воды в реке Майма (АК «Майма») в марте – апреле 2017 г. в точке наблюдения № 2 (пос. Филиал)

Важным показателем поступления талых вод в реку является понижение температуры воды, происходящее синхронно с подъемом ее уровня (рисунок 3.16). Температурный минимум в 2017 г. был зарегистрирован 31 марта и составил 1,9 °С, что соответствует дате первого пика половодья. Также по окончании первого этапа половодья синхронизованы спад уровня воды в реке и повышение ее температуры. Коэффициент корреляции рядов среднесуточных значений параметров во время первого пика половодья (с 26.03 по 06.04) r = –0,85 при p = $5{,}22 \cdot 10^{-4}$ и выборке N = 12.

Фактическая погода в период вскрытия рек и первой волны половодья 2017 г. в бассейне Верхней Оби оказалась идеальной для смягчения последствий активного снеготаяния больших объемов снегозапасов – периоды теплой, а временами и жаркой погоды сменялись холодными периодами, что сбивало динамику роста уровней воды в реках. Также чередование теплых и холодных процессов постепенно разрушило снегозапасы в горах Республики Алтай. Это позволило избежать значительных превышений отметок затопления [Люцигер и др., 2017; Зуев и др., 2020а].

### 3.3.3. Формирование половодья 2018 года

Осенью 2017 г. после резкого похолодания 25–28 октября до +2 °С днем и –11 °С в утренние часы, к 3 ноября в дневное время в пунктах наблюдения регистрировалось повышение температуры до 21–23 °С. Однако уже 4 ноября она не поднималась выше +6 °С, а 8 ноября установился постоянный снежный покров (рисунок 3.18). В пункте № 3 при выхолаживании воздуха в ночное время до минимальных температур около –20 °С в последние дни ноября и в первой декаде декабря (рисунок 3.10(б)) и низком уровне снежного покрова 20 см был зарегистрирован переход через 0 °С температуры почвы и одновременно быстрое снижение влажности от 41 % (27 октября 2017) до 26 % (4 декабря 2017) (рисунок 3.18).

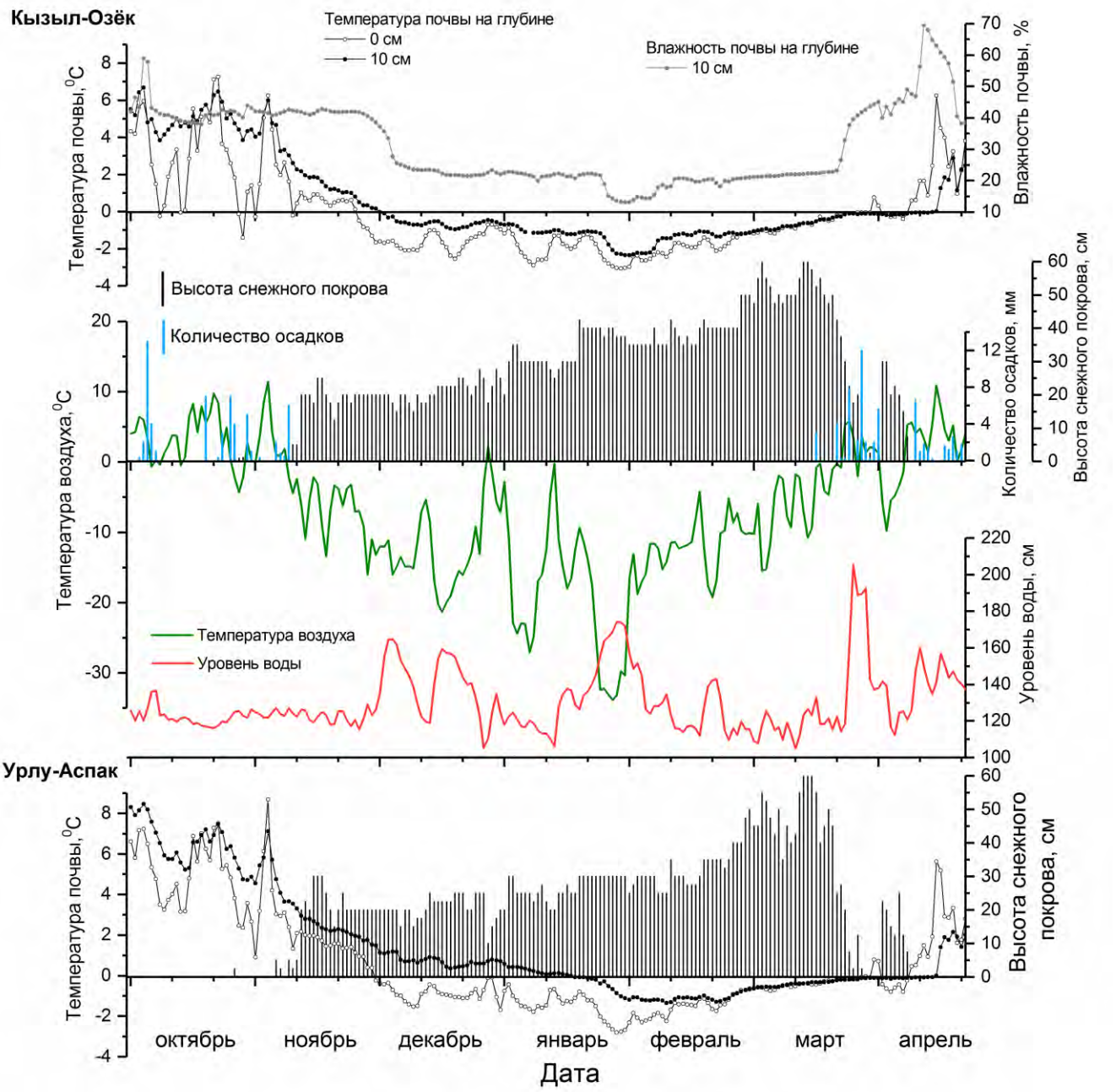



Рисунок 3.18 – Комплексный график данных в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) с 1 октября по 20 апреля 2017–2018 гг.

Температура воздуха в период календарной зимы 2017–2018 гг. была значительно ниже, чем в соответствующие месяцы предыдущих лет. Самым холодным месяцем стал также январь (таблица 3.4). Во время похолодания 1–6 января минимальные температуры опускались до –30 °С (рисунок 3.18). С 22 по 26 января в п. № 3 зарегистрированы аномально низкие для данного периода температуры (рисунок 3.10(в)). В ночное время воздух вымораживался –38 °С (рисунок 3.18). В пункте наблюдения № 1 в эти периоды фиксировались

температуры до –25 и –35 °С соответственно. В целом, температурный режим декабря и января отличался резкими перепадами: похолодания во второй декаде декабря, в первой и третьей декадах января чередовались с аномальными потеплениями, при которых дневные температуры повышались до +8 °С (26 декабря 2017), +7 °С (11 января 2018) (рисунок 3.10(в), 3.19). Однако, несмотря на погодные аномалии, температура и влажность почвы на глубине 10 см в пункте № 3 практически не менялись вплоть до 19 марта 2018 г. Исключением является временной интервал 24 января – 4 февраля 2018 г., в течение которого при понижении температуры почвы до минимального значения –2,4 °С влажность почвы опустилась до 13,2 %. Высота снежного покрова в этот период составляла 35–40 см [Зуев и др., 2020а].

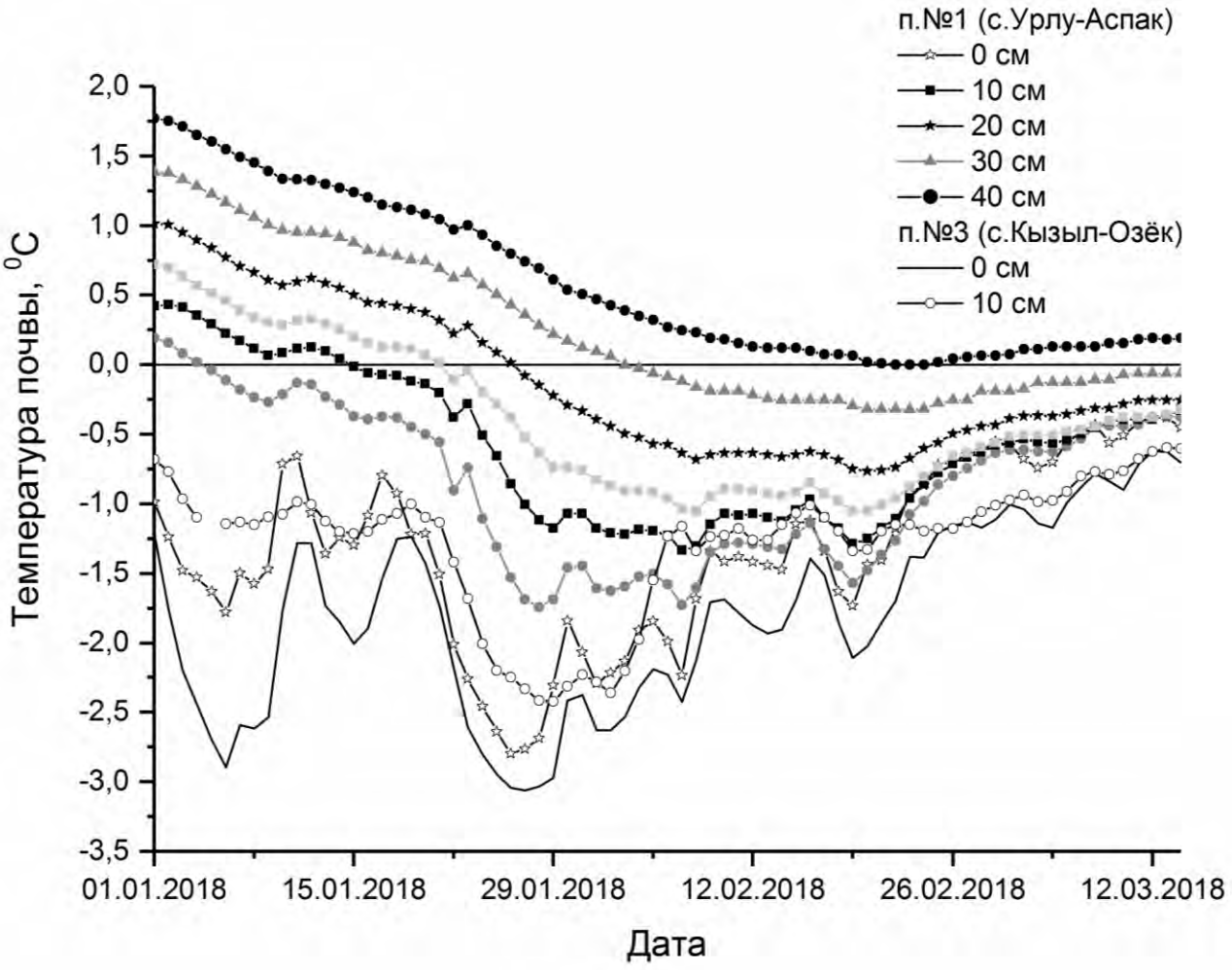



Рисунок 3.19 – Временные ряды средних суточных значений температуры почвы в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) за период 1 января – 15 марта 2018

В пункте № 1 потепления 26 декабря и 11 января были более выраженными, как по температуре, так и по длительности, и, как следствие, высота снежного покрова в январе здесь была ниже и достигала 30 см. В данном пункте переход температуры почвы через 0 °С был зарегистрирован лишь 16 января. Дальнейшее замерзание почвы стало прямым следствием похолодания 22–26 января (рисунок 3.18). Глубина промерзания достигала 40 см (рисунок 3.19) [Зуев и др., 2020а].

Весной 2018 года процесс снеготаяния протекал при значительных колебаниях внутрисуточных температур, чем обусловлены невысокие, особенно для пункта № 3, их средние значения период снеготаяния. Во время короткого безморозного периода 21–24 марта средние дневные температуры составляли 13,7 °С и 17,6 °С для пункта № 3 и № 1 соответственно (рисунок 3.20) [Зуев и др., 2020а].

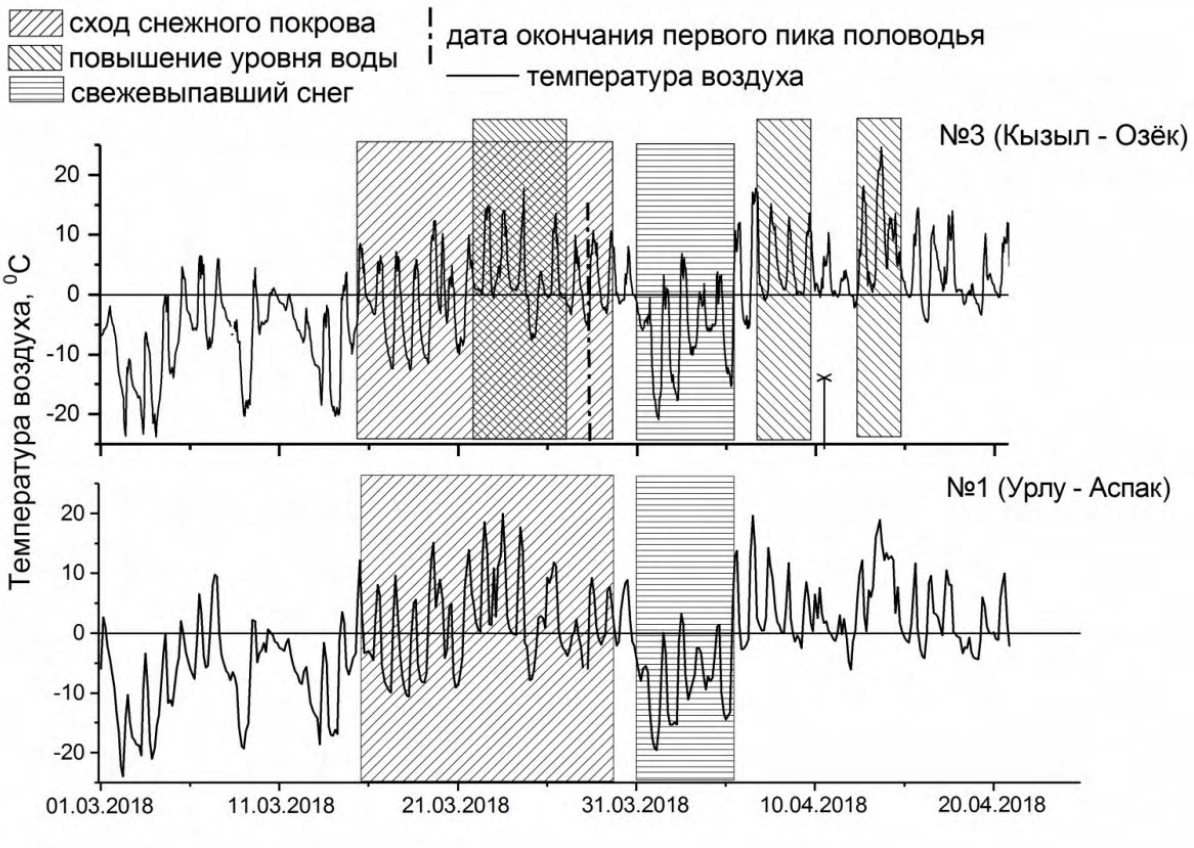



Рисунок 3.20 – Временные ряды почасовых значений температуры воздуха в марте – апреле 2018 г. в двух пунктах наблюдений: № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак)

Средние суточные температуры воздуха в марте 2018 г., преимущественно оставаясь в пределах СКО, были выше многолетнего среднего (рисунок 3.10(в)). Температуры на уровне нижнего предела СКО регистрировались лишь в первой половине месяца, в течение которой оттепели чередовались с периодами ночного вымораживания воздуха до температур от –17 °С до –24 °С (рисунок 3.20). Резкая смена погоды сопровождалась выпадением значительного количества твердых осадков, поэтому к началу снеготаяния снежный покров в пунктах наблюдений был достаточно высоким (рисунок 3.18, таблица 3.4). Интенсивное стаивание снега началось в середине второй декады месяца с переходом через 0 °С дневных температур (рисунок 3.20). Первоначально процесс снеготаяния сдерживался ночными заморозками до –12 °С. С 21 марта по 24 марта включительно средние суточные температуры в пунктах наблюдения были выше верхнего предела СКО многолетнего среднего (рисунок 3.10(в)). В пункте наблюдения № 3 средняя за период температура воздуха составляла 3,5 °С (при многолетней норме –3,3 °С) при дневном максимуме 17,8 °С, в пункте наблюдения № 1 – 5,9 °С при дневном максимуме 20 °С [Зуев и др., 2020а].

Резкое потепление стало причиной быстрого развития половодья. На Рисунке 3.21 представлена динамика изменения средних суточных значений уровня и температуры воды в реке, полученные по данным АК «Майма», показано количество жидких осадков и высота снежного покрова, сформировавшегося в результате выпадения твердых осадков, в период половодья, приведены данные уровня воды в точках экстремумов. Здесь же показана динамика изменения средних суточных значений уровня воды по гидрологическому посту в с. Майма. Основные характеристики развития половодья приведены в Таблице 3.5.

Анализ средних суточных данных, полученных по АК «Майма», показал, что первый пик половодья сформировался в течение 2 суток, 22–24 марта (таблица 3.5, рисунок 3.21). Уровень воды в районе пункта № 2 (пос. Филиал) поднялся на 87 см до отметки 205 см. Скорость подъема приведена в Таблице 3.5. По средним суточным данным АК «Майма» максимальный уровень сохранялся в

течение 4 суток. Уровень воды в реке 28 марта понизился до 142 см, а начавшееся 31 марта значительное похолодание (рисунок 3.20) способствовало его дальнейшему спаду до отметки 112 см. [Зуев и др., 2020а].

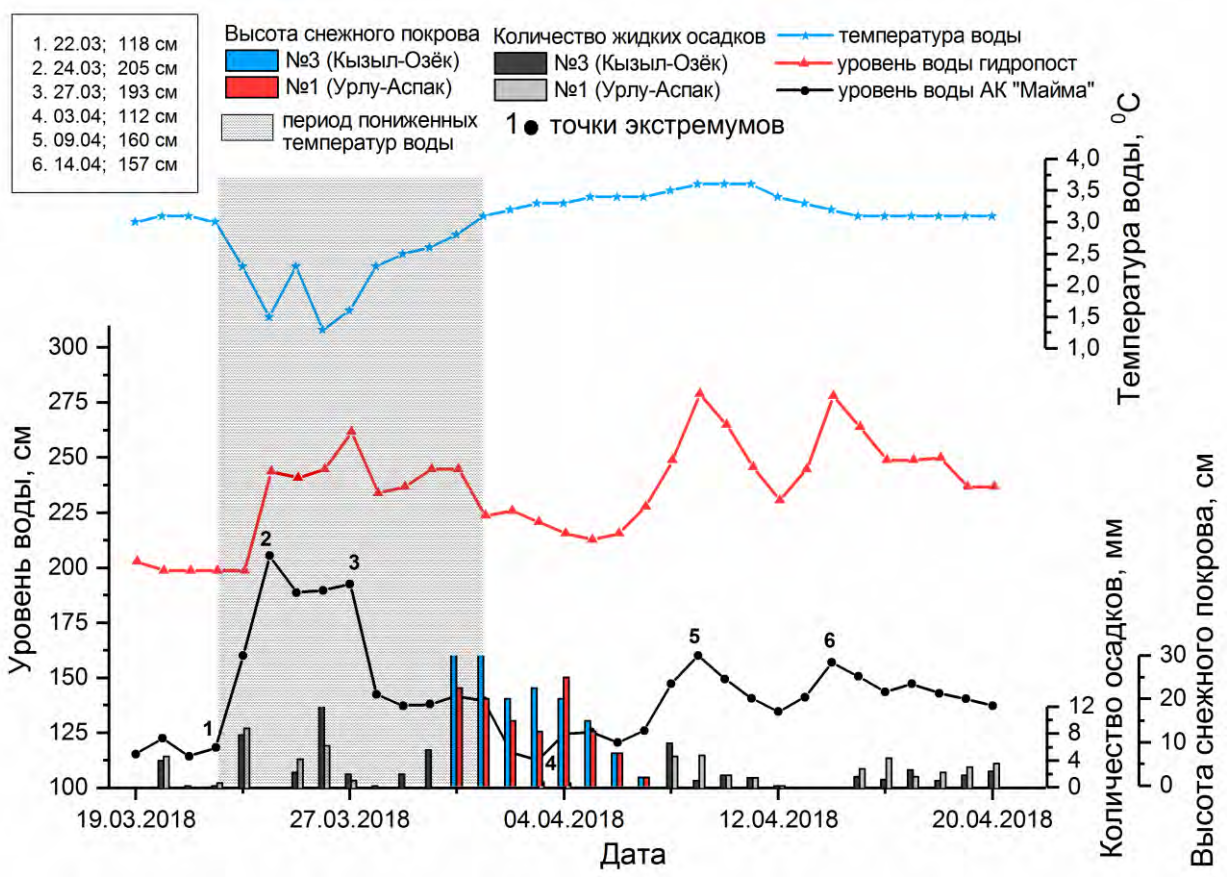



Рисунок 3.21 – Средние суточные значения уровня воды в реке, количества жидких осадков и высоты снежного покрова в пунктах наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) и № 1 (с. Урлу-Аспак) в период начала половодья 2018 г.

Синхронно с подъемом уровня воды в реке в районе пункта № 2 началось понижение ее температуры, связанное с поступлением в реку талых вод (рисунок 3.21). Также синхронизованы спад уровня воды в реке после прохождения первого пика половодья и повышение ее температуры. Коэффициент корреляции рядов среднесуточных значений параметров во время прохождения первого этапа половодья (с 22 марта по 3 апреля) $r = -0{,}91$ при $p = 1{,}6 \cdot 10^{-5}$ и выборке $N = 13$ [Зуев и др., 2020а].

В докладе Министерства природных ресурсов, экологии и имущественных отношений Республики Алтай [МПРиЭРА, 2018] к категории чрезвычайных ситуаций природного характера причислен паводок 26–27 марта «на ряде малых

рек республики», к разряду которых относится и р. Майма (рисунок 3.22). Ранее было показано, что в условиях быстрого, в течение нескольких часов, изменения уровня воды, объективную информацию можно получать, только используя данные регулярных почасовых измерений. Временной ряд почасовых значений уровня воды, полученный по данным АК «Майма» представлен на Рисунке 3.22.

Резкое похолодание 31 марта – 1 апреля (в 5 утра 1 апреля в п. № 3 была зарегистрирована температура –20,8 °С, в № 1 –19,5 °С) сопровождалось выпадением большого количества твердых осадков. В докладе Министерства природных ресурсов, экологии и имущественных отношений Республики Алтай [МПРиЭРА, 2018] сильный снегопад ночью 31 марта, при котором на метеостанции Кызыл-Озек за 12 часов выпало до 22–29 мм осадков, оценивается, как чрезвычайная ситуация природного характера. С потеплением и таянием выпавшего в период похолодания снега, с 6 апреля началось формирование второго, по данным значительно более низкого, пика половодья (рисунок 3.21) [Зуев и др., 2020а].

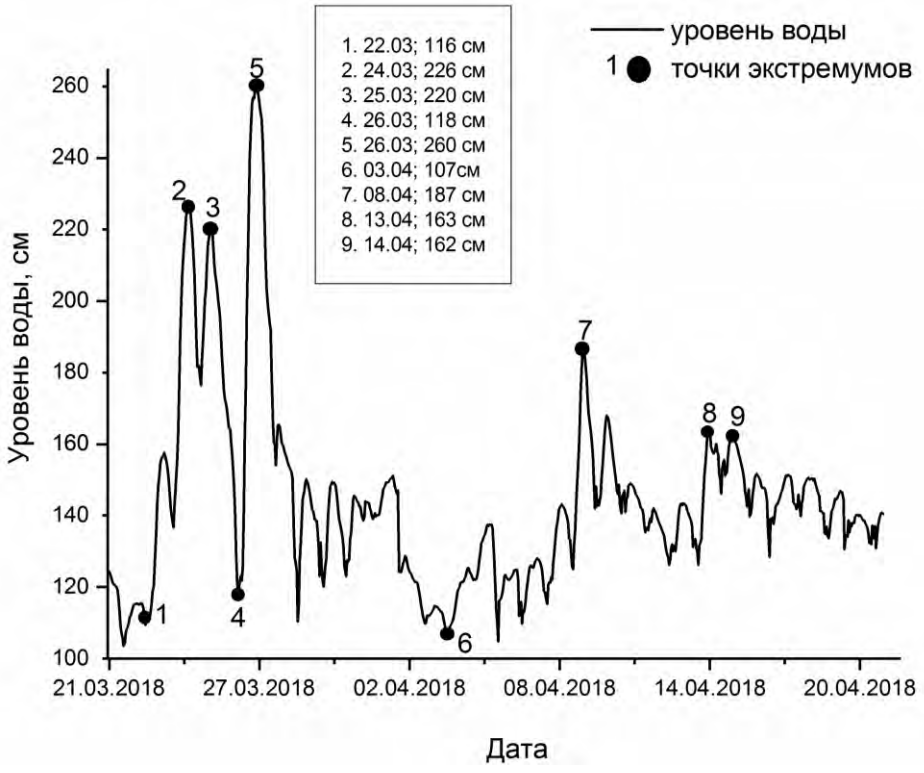



Рисунок 3.22 – Ряды почасовых значений уровня воды в реке Майма (АК «Майма») в марте – апреле 2018 г. в точке наблюдения № 2 (пос. Филиал)

### 3.3.4. Анализ характера половодья в 2016, 2017 и 2018 годах

В течение трех лет наблюдений сроки начала половодья фактически совпадали (22–26 марта). Однако длительность формирования первого пика и характер половодья были абсолютно разными. На Рисунке 3.23 представлен временной ряд средних суточных значений уровня воды с 15 марта по 20 апреля за 2016, 2017, 2018 гг. в сравнении с многолетним средним уровнем над нулем гидропоста в створе р. Майма за период 1940–2018 гг., (период выбран аналогично Рисунку 3.10) [Зуев и др., 2020а].

Прежде всего, первый пик половодья 2017 и 2018 гг. сформировался в середине периода снеготаяния, и по сравнению с 2016 г. подъем воды происходил в значительно более сжатые сроки. Половодье 2018 г. можно считать особым событием по скорости подъема уровня воды в реке. По средним суточным данным гидрологического поста за одни сутки, с 23 на 24 марта, уровень реки поднялся на 45 см. По данным АК «Майма» (п. № 2) скорость подъема реки составляла 43 см/сут. Детализация половодья с использованием почасовых данных АК «Майма» показывает, что 23 марта за период с 14:00 до 24:00 часов уровень воды поднялся на 79 см до отметки 216 см, а в ночь 26–27 марта уровень реки достиг 260 см (рисунок 3.22). Внезапный интенсивный подъем уровня воды, существенные амплитуды внутрисуточных колебаний при отсутствии выпадения значительного количества осадков в 2018 г. (23 и 26 марта в п. № 3 выпало 8 и 12 мм осадков соответственно), нестандартный характер паводка 2017 г., делают актуальной задачу поиска доминирующего фактора, определяющего возможность развития экстремальных ситуаций во время половодья. Прежде всего, речь идет о сроках начала половодья относительно периода снеготаяния и интенсивности подъема уровня воды [Зуев и др., 2020а; Зуев и др., 2020б].

В комплекс факторов, от которых зависит скорость подъема уровня воды в период весеннего половодья, включают такие параметры, как степень осеннего увлажнения почвы и глубина ее промерзания. Они являются определяющими соотношения инфильтрации и стока талой воды, температурного режима и

количества осадков в период активного снеготаяния [Романов и др., 2017; Зуев и др., 2020а]. Например, из-за незамерзшего верхнего слоя почвы большие объемы талой воды после поглощения подняли уровень грунтовых вод в Алтайском крае и Республике Алтай в 2017 г., которые в свою очередь подтопили ряд населенных пунктов [Люцигер и др., 2017].

Во время исследовательских работ на оз. Красилово также было показано, что весной 2014 г. интенсивный поверхностный сток талых вод в озеро произошел после малоснежной зимы с невысоким запасом воды в снежном покрове и невысокой скорости снеготаяния. Анализ температурного режима почвы показал, что развитию грунтового стока препятствовало образование в почве ледяного запирающего слоя [Зуев и др., 2016].

По данным измерений АК «Майма», степень осеннего увлажнения почвы на момент установления постоянного снежного покрова в течение трех лет наблюдений была достаточно высокой и практически одинаковой (таблица 3.4, рисунок 3.11, 3.14, 3.18) (влажность составляла около 43 %). Для сравнения, в Таблице 3.6 приведены средние значения влажности, рассчитанные по данным АК «Майма» за весь период наблюдений (7.10.2015–30.09.2018).

Таблица 3.6 – Средние значения влажности (%), рассчитанные по данным АК «Майма»

| Значения | Полный период | Май – сентябрь | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 2016 | 2017 | 2018 |
| Среднее | 33 % | 32,6 % | 31 % | 29,8 % |
| Максимум | 74,1 % (10.04.2018; 09:00) | 49,7 % | 45,8 % | 46,3 % |
| Минимум | 13 % (29.01.2018; 05:00) | 22,8 % | 20,8 % | 19,6 % |

В холодный период после установления постоянного снежного покрова (ноябрь–февраль) динамика состояния почвы определялась совокупностью таких факторов, как температура воздуха и высота снежного покрова. Анализ полученных АК «Майма» данных показал не только существенные межгодовые различия температурного режима и влажности почвы, но и выявил отличия

внутригодовой динамики измеряемых параметров в двух пунктах наблюдений, расположенных на территории бассейна реки всего в 30 км друг от друга (см. таблицы 3.4, 3.5, рисунки 3.11, 3.14, 3.18) [Зуев и др., 2020а; Зуев и др., 2020б].

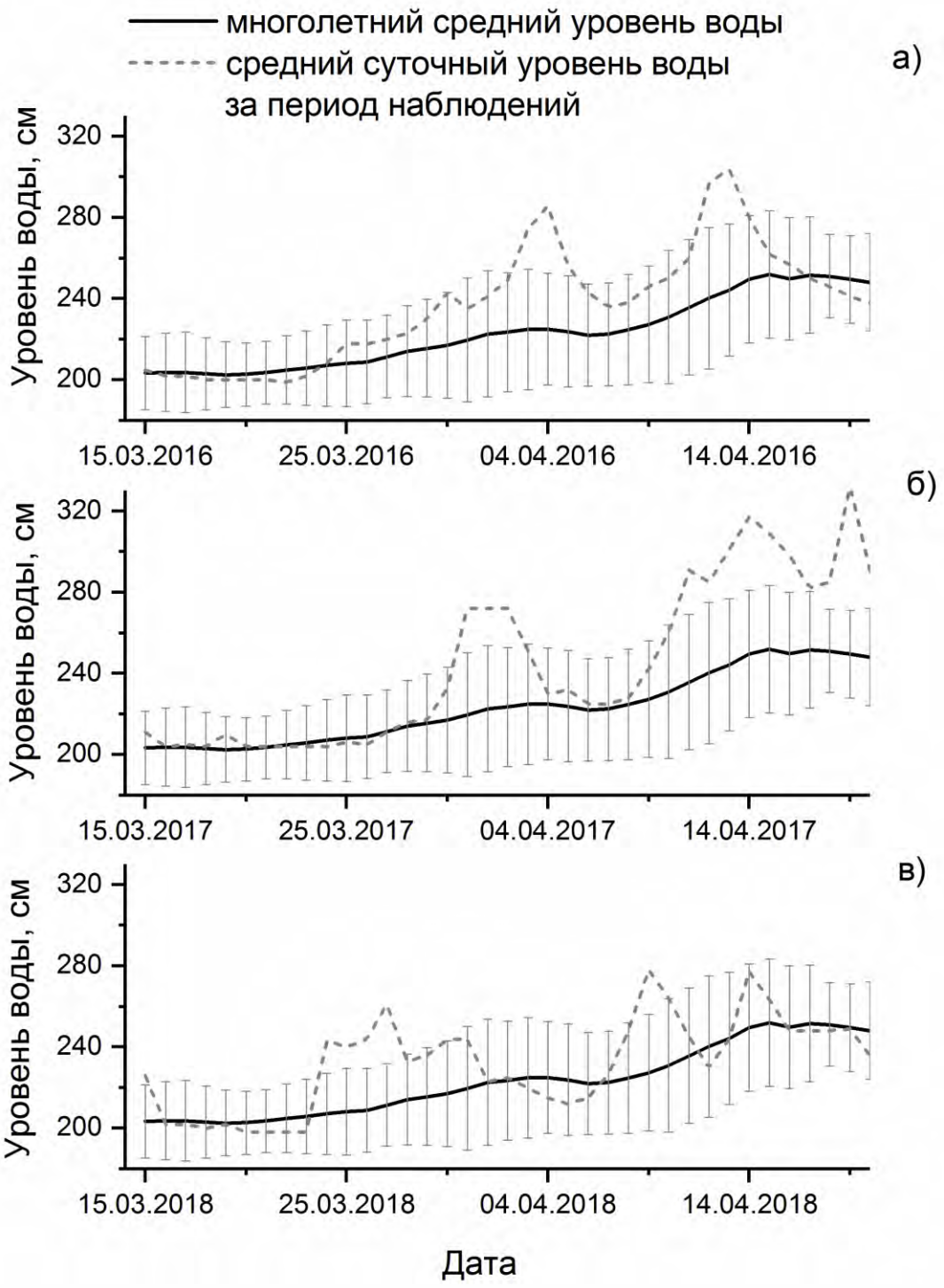



Рисунок 3.23 – Временные ряды уровня воды за период наблюдений с 15 марта по 20 апреля 2016–2018 гг. в сравнении с многолетним средним для гидропоста с. Майма: а) 2016 г.; б) 2017 г.; в) 2018 г.

На Рисунках 3.24–3.26 показана динамика гидрометеорологической ситуации в среднем течении р. Майма в п. № 3 за период с 1 марта по 20 апреля 2016, 2017 и 2018 гг. Из графиков видно, что АК позволяет определять инфильтрационные свойства почвы – промерзание или переувлажнение. Данные факторы влекут за собой образование водоупора в поверхностном слое во время прохождения половодья, когда поверхностный сток увеличивается и резко возрастает интенсивность паводков.

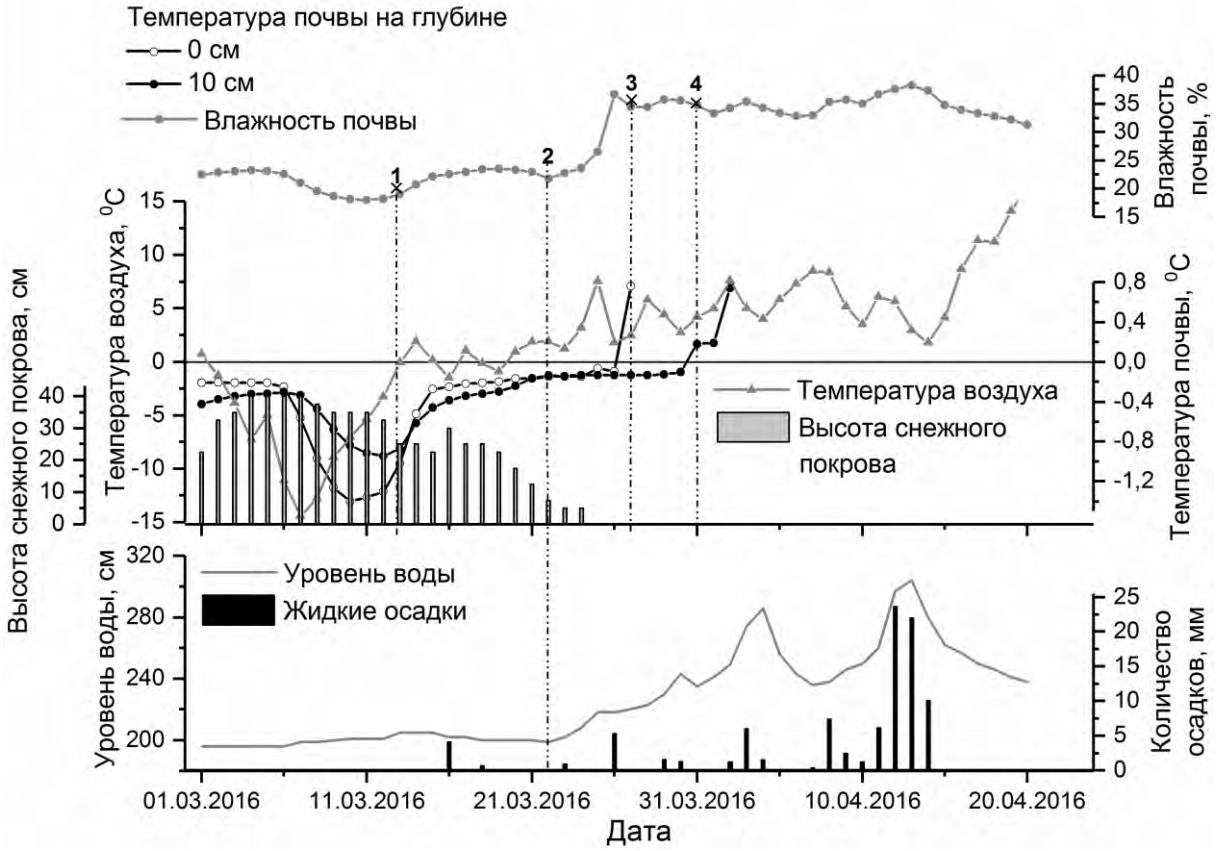



Рисунок 3.24 – Комплексный график данных в пункте наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) с 1 марта по 20 апреля 2016 (уровень воды по гидропосту с. Майма); 1 – начало периода интенсивного снеготаяния, 2 – начало формирования первого пика половодья, 3 – дата перехода через 0 °С температуры верхнего слоя почвы, 4 – дата перехода через 0 °С температуры почвы на глубине 10 см

Исследования Л. Ф. Лубенец с соавт. [2018в] зимних периодов с 2015-2017 гг. говорят о том, что зима 2016/17 г. относятся к тёплой и среднеснежной, а зима 2015/16 г. – к тёплой и малоснежной. Зима 2017/2018 отражена в работе Л. Ф. Лубенец с соавт. [2019в] из которой следует, что в условиях малоснежной и средней по температуре воздуха зимы 2017/18 г. в бассейне р. Майма на трех

высотных уровнях распределение снегонакопления характеризуется неоднородностью. Схожие выводы были получены по данным автономного комплекса. В сезон 2015–2016 гг., несмотря на относительно теплую, с аномальными оттепелями, зиму, невысокий уровень снега, до 30 см, и низкие температуры января спровоцировали замерзание влажной почвы с образованием мерзлого слоя, о чем свидетельствует резкое падение влажности на глубине 10 см при переходе температуры почвы через 0 °С. В 2017–2018 гг. образование мерзлого слоя в п. № 3 на фоне низкого уровня снежного покрова произошло еще в ноябре, а при аномально низких температурах января на глубину до 40 см промерзла почва в п. № 1 (рисунок 3.11, 3.14, 3.18) [Зуев и др., 2020а]. В 2016–2017 гг. мощный снежный покров препятствовал промерзанию почвы, сохранив высокий уровень влажности [Зуев и др., 2020б]. Значения влажности к началу активного снеготаяния показаны в Таблице 3.6.

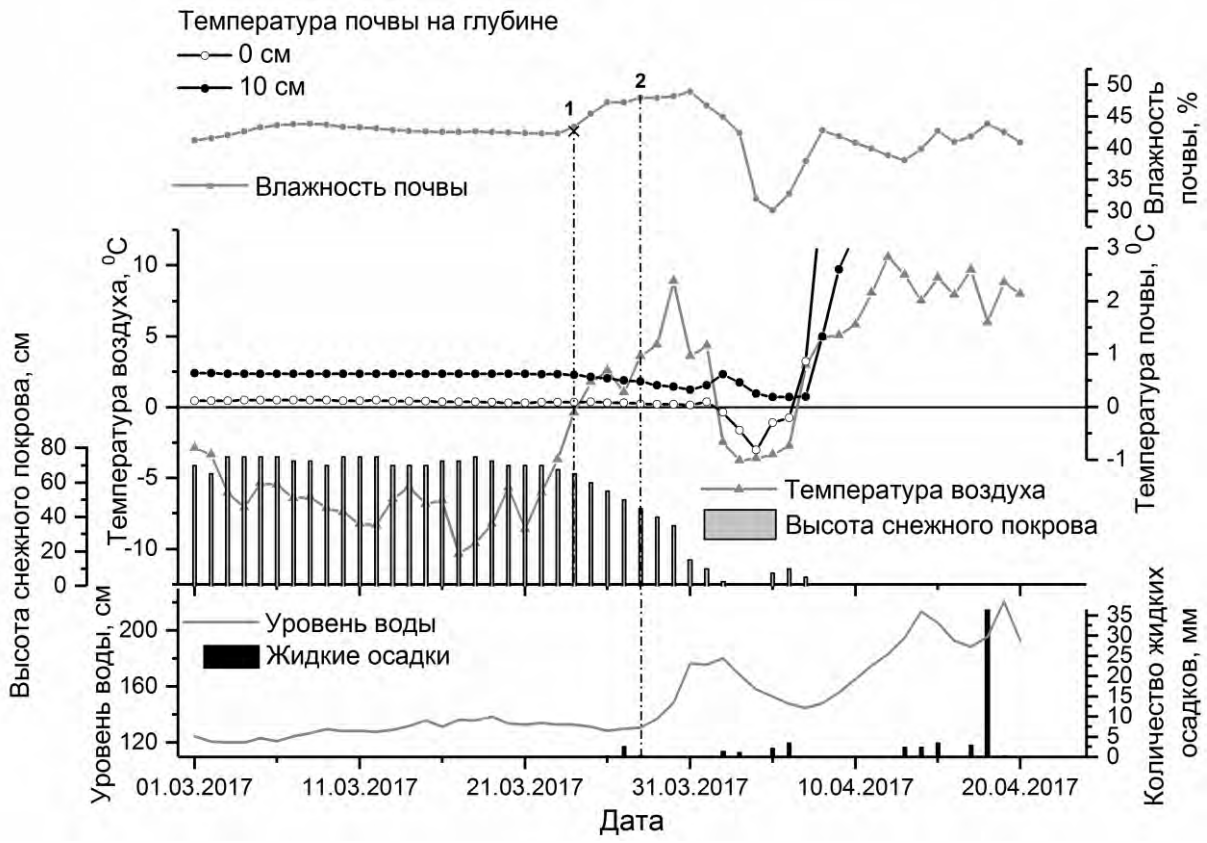



Рисунок 3.25 – Комплексный график данных в пункте наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) с 1 марта по 20 апреля 2017 (уровень воды по п. № 2); 1 – начало периода интенсивного снеготаяния, 2 – начало формирования первого пика половодья

Учитывая точность измерений, автономный характер работы, возможность дистанционной передачи оперативных данных наблюдений и широкий набор измеряемых параметров, АК «Майма» можно считать перспективным инструментом комплексного мониторинга гидрометеорологического состояния бассейна р. Майма [Зуев и др., 2020а].

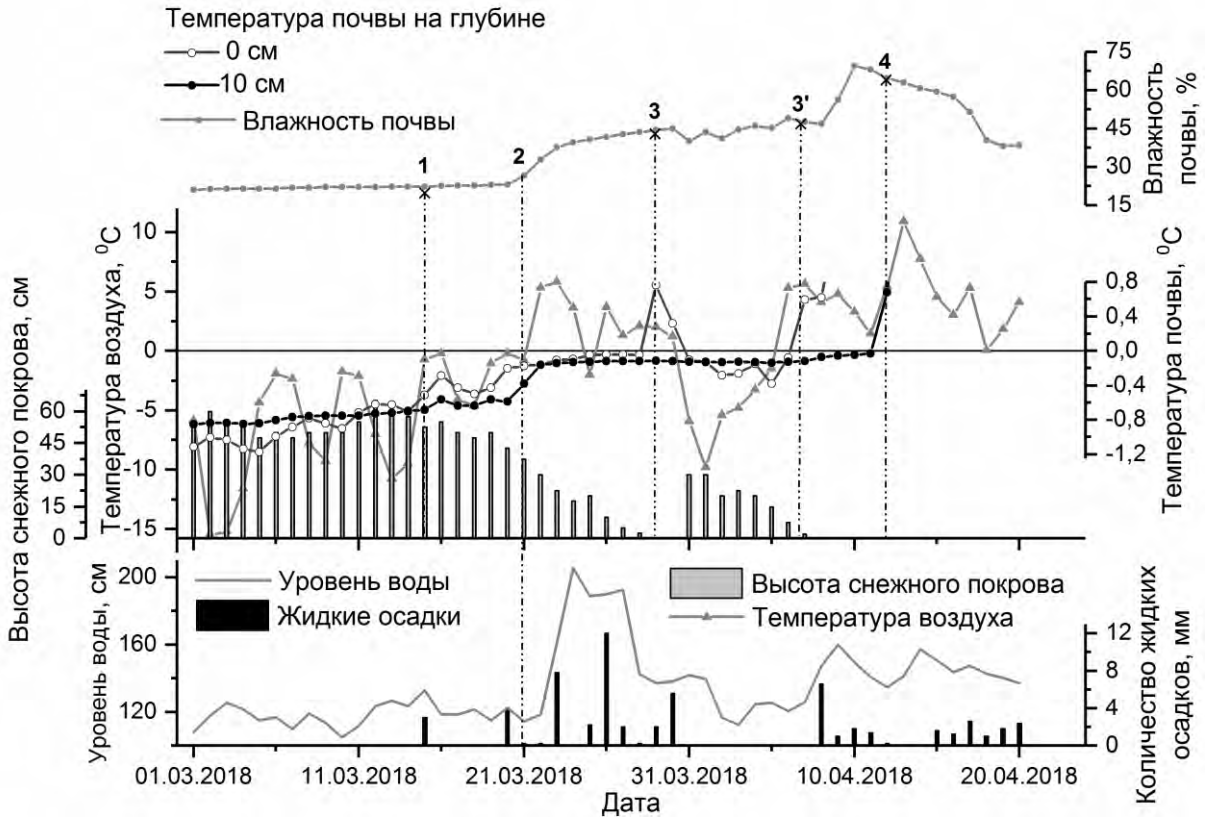



Рисунок 3.26 – Комплексный график данных в пункте наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) с 1 марта по 20 апреля 2018 (уровень воды по п. № 2); 1 – начало периода интенсивного снеготаяния, 2 – начало формирования первого пика половодья, 3, 3’ – дата перехода через 0 °С температуры верхнего слоя почвы, 4 – дата перехода через 0 °С температуры почвы на глубине 10 см

Также основным преимуществом АК «Майма» является осуществление непрерывного дистанционного мониторинга гидрометеорологической ситуации в реальном времени с любой заданной периодичностью измерений в любой точке водосбора, что значительно повышает степень объективности информации и позволяет предопределять развитие гидрометеорологической ситуации, в том числе в период половодья. То есть, совмещая долговременный прогноз, мониторинг АК «Майма» и действующий прогноз погоды, можно

заблаговременно предупредить о критическом подъеме уровня воды в бассейне реки Майма в период весеннего половодья на основе синхронных наблюдений в нескольких точках водосбора, что позволит уменьшить ущерб от ЧС в бассейне реки [Зуев и др., 2020а; Зуев и др., 2020б].

## Выводы по главе 3

1) Гидрометеорологическая информация, получаемая с помощью АК «Майма», является репрезентативной и согласуется с официальными данными Росгидромета. На метеостанции в с. Кызыл-Озёк и АК «Майма» коэффициент корреляции температурных данных равен 0,99, ежедневного количества осадков 0,71, а уровня воды 0,92 с одинаковой динамикой изменения (значения коэффициентов достоверны при уровне значимости 0,05).

2) Получаемую с помощью АК «Майма» гидрометеорологическую информацию, при условии высотной привязки датчика уровня воды можно использовать для прогноза уровенного режима р. Майма в режиме «наукастинг» и для обеспечения оперативными данными административных структур, населения и МЧС.

3) Осуществляемый с помощью автоматизированного комплекса «Майма» непрерывный дистанционный мониторинг инфильтрационных свойств почв совместно со сверхкраткосрочным прогнозом жидких осадков Росгидромета позволяет заблаговременно предупредить о критическом подъеме уровня воды в пределах г. Горно-Алтайска и с. Майма в период весеннего половодья на основе синхронных гидрометеорологических наблюдений в нескольких точках водосбора.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристика региональных природных особенностей рассматриваемого водосбора, исследование внутригодовой и межгодовой динамики гидрометеорологических характеристик в многолетнем периоде, современный комплексный мониторинг гидрометеорологических процессов и инфильтрационных свойств почв посредством АК «Майма» позволили разработать научную основу для снижения опасности наводнения в бассейне реки Майма (Республика Алтай).

**Основные выводы:**

1) Ключевым фактором изменений водного режима р. Майма являются климатические изменения, наблюдаемые в холодный период года. Средние максимальные расходы воды в апреле 1976–2016 гг. по сравнению с 1940–1975 гг. снизились на 35 %, объем половодья в среднем уменьшился на 9 %, увеличилась водность в летне-осеннюю межень в период с 1976–2016 гг. на 5,4 %, главным образом, в результате повышения водности июля и августа.
2) При общем повышении температур воздуха с 1976 г. на реке Майма наблюдается снижение максимальных зимних уровней воды (коэффициент линейного тренда 14 см/10 лет).
3) Потепление зим проявляется в ледовом режиме р. Майма: с начала периода современного изменения климата (1976 г.) наблюдается сокращение продолжительности ледостава, смещение дат замерзания реки – на более поздние, а дат вскрытия – на более ранние.
4) Гидрометеорологическая информация, получаемая с помощью АК «Майма», является репрезентативной и согласуется с официальными данными Росгидромета. На метеостанции в с. Кызыл-Озёк и АК «Майма» коэффициент корреляции температурных данных равен 0,99, ежедневного количества осадков 0,71, а уровня воды 0,92 с одинаковой динамикой изменения (значения коэффициентов достоверны при уровне значимости 0,05).

5) Получаемую с помощью АК «Майма» гидрометеорологическую информацию, при условии высотной привязки датчика уровня воды можно использовать для прогноза уровенного режима р. Майма в режиме «наукастинг» и для обеспечения оперативными данными административных структур, населения и МЧС.
6) Осуществляемый с помощью автоматизированного комплекса «Майма» непрерывный дистанционный мониторинг инфильтрационных свойств почв совместно со сверхкраткосрочным прогнозом жидких осадков Росгидромета позволяет заблаговременно предупредить о критическом подъеме уровня воды в пределах г. Горно-Алтайска и с. Майма в период весеннего половодья на основе синхронных гидрометеорологических наблюдений в нескольких точках водосбора.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

**Авакян, А. Б.** Наводнения в прошлом, настоящем и будущем: концепция защиты / А. Б. Авакян // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2001. № 10. С. 43–49.

**Аванесян, Р. А.** Направленность современных изменений основных гидрометеорологических характеристик Алтайской горной области [Электронный ресурс] / Р. А. Аванесян, М. Г. Сухова // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. (Электронный ресурс). – URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5219 (дата обращения: 06.2019).

**Антонов, В. Н.** Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в Сибирском федеральном округе / В. Н. Антонов, О. Г. Новгородцева // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4, № 1. С. 104–110.

**Атлас** Алтайского края. – М. ; Барнаул : Издательство ГУГК, 1978. Т. 1. 226 с.

**Безруков, Л. А.** Водные ресурсы Сибири: состояние, проблемы и возможности использования / Л. А. Безруков, О. В. Гагаринова, Н. В. Кичигина, Л. М. Корытный, Р. А. Фомина // География и природные ресурсы. 2014. № 4. С. 30–41.

**Болгов, М. В.** Опасные гидрологические явления: методы анализа, расчета и прогнозирования, смягчение негативных последствий / М. В. Болгов, С. В. Борщ, Р. М. Хазиахметов // VII Всероссийский гидрологический съезд 19–21 ноября 2013 г.: тезисы пленарных докладов. г. Санкт-Петербург, 2013. С. 6–22.

**Болгов, М. В.** Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока / М. В. Болгов, Е. А. Коробкина // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. №. 3. С. 87–102.

**Болгов, М. В.** О некоторых вопросах, связанных с прогнозированием чрезвычайных ситуаций, вызванных гидрологическими опасными

явлениями и их последствиями / М. В. Болгов, Е. В. Арефьева // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. Т. 4, № 35. С. 102–110.

**Бузин, В. А.** Наводнения на реках России при современных тенденциях изменения климата / В. А. Бузин, З. Д. Копаливани // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2007. № 5. С. 43–54.

**Всероссийский** научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс] // Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные). (Электронный ресурс). – URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation (дата обращения 08.2019).

**Второй оценочный доклад** Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2014. 1009 с.

**Галахов, В. П.** Условия формирования половодья малой горной реки (по исследованиям в бассейне реки Майма) / В. П. Галахов // Известия Алтайского отделения географического общества. 2015. Т. 38, № 3. С. 35–40.

**Галахов, В. П.** Расчет объема стока первой волны половодья Оби у Барнаула. / В. П. Галахов, А. А. Сюбаев // Барнаул: Издательство АлтГУ, 2016. 122 с.

**География Сибири** в начале XXI века. Западная Сибирь / гл. ред. В. М. Плюснин; отв. ред. Ю. И. Винокуров, Б. А. Красноярова. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2016. Т. 5. 447 с.

**Гинзбург, Б. М.** Сроки замерзания и вскрытия рек в конце XX века и возможные их изменения в XXI веке / Б. М. Гинзбург // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 12. – С. 88–97.

**Главное управление МЧС** России / Оперативная сводка. 2014. (Электронный ресурс). – URL: http://04.mchs.gov.ru (дата обращения 05.2018).

**Горошко, Н. В.** Способы оценки пространственно-временных колебаний стока (на примере бассейна Верхней Оби) / Н. В. Горошко // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1, № 1. С. 55–65.

**Датчик высоты снежного покрова: Пат. 2542598** / С. А. Кураков, П. С. Куракова, В. Г. Ушаков, Е. А. Макеев, А. В. Дьячков, К. Л. Жуйков, Е. В. Сидоркина; ИМКЭС СО РАН. 22.01.2015.; Опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.

**Датчик температуры** Arduino DS18B20. (Электронный ресурс). – URL: https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/arduino-ds18b20/ (дата обращения 08.2019).

**Донченко, Р. В.** Ледовый режим рек СССР / Р. В. Донченко // Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 242 с.

**Ельчининова, О. А.** Элементный состав атмосферных и поверхностных вод бассейна р. Майма / О. А. Ельчининова, О. В. Кузнецова, Т. А. Рождественская // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III Всероссийской научной конференции с международным участием. Барнаул, 28 августа–1 сентября 2017 г. Барнаул, 2017.Т. 2. С. 58–62.

**Живой журнал** (LiveJournal) // Наводнение на Алтае. – 2014. (Электронный ресурс). – URL: https://zapovedniy.livejournal.com/29740.html (дата обращения 03.2018).

**Задде, Г. О.** Региональные климатические изменения метеорологических полей / Г. О. Задде, С. Г. Катаев, А. И. Кусков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4. Томск, 2000. С. 11–56.

**Зиновьев, А. Т.** Экстремальный дождевой паводок 2014 года в бассейне Верхней Оби: причины, прогноз и натуральные наблюдения / А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, А. В. Дьяченко, А. А. Коломейцев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 6. С. 93–104.

**Золотов, Д. В.** Анализ климатогидрологического фона для оценки водных ресурсов (к методике ландшафтно-гидрологических исследований) / Д. В. Золотов, О. П. Николаева, Д. В. Черных // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летнему юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 20–24 августа 2012 г. Барнаул, 2012. Т. 1. С. 48–52.

**Золотов, Д. В.** Ландшафтные факторы формирования стока в бассейне реки Майма (Северный и Северо-Восточный Алтай) / Д. В. Золотов, Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Мир науки, культуры и образования. 2012. Т. 33, № 2. С. 360–369.

**Зуев, В. В.** Динамика весеннего подъема уровня бессточных озер (на примере озера Красиловское Алтайского края) / В. В. Зуев, Н. Е. Зуева, С. А. Кураков, И. А. Суторихин, Н. Ф. Харламова // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 76–80.

**Зуев, В. В.** Комплексный мониторинг погодно-климатического и гидрологического режима бассейна р. Майма (Горный Алтай): первые результаты / В. В. Зуев, С. А. Кураков, В. А. Уйманова // Ползуновский вестник. 2017. № 3. С. 70–75.

**Зуев, В. В.** Сравнительный анализ гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и автономного измерительного комплекса «Майма» в бассейне р. Майма (Горный Алтай) / В. В. Зуев, Е. М. Короткова, В. А. Уйманова, С. А. Кураков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 5. С. 65–74.

**Зуев, В. В.** Водный и ледовый режим реки Майма (Горный Алтай) в условиях современных изменений климата / В. В. Зуев, Е. М. Короткова, В. А. Уйманова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 5. С. 25–39.

**Зуев, В. В.** Комплексная оценка инфильтрационных свойств почв и гидрометеорологического режима бассейна реки Майма, Горный Алтай /

В. В. Зуев, Н. Е. Зуева, В. А. Уйманова, С. А. Кураков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. №2. С. 118–134.

**Зуев, В. В.** Роль синхронных наблюдений в мониторинге гидрометеорологического режима на примере бассейна реки Майма, Горный Алтай / В. В. Зуев, Н. Е. Зуева, В. А. Уйманова // Проблемы региональной экологии. 2020. №4. С. 43–47.

**Изменение климата** и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / под ред. А. О. Кокорина // Всемирный фонд дикой природы (WWF России). М., 2011. 168 с.

**Ипполитов, И. И.** Региональные особенности современных климатоэкологических изменений в Сибири / И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, Г. О. Задде // Вестник ТГУ. 2003. Т. 4, № 3. С. 174–178.

**Ипполитов, И. И.** Изменчивость климата азиатской территории России в 1975–2012 годах. / И. И. Ипполитов, С. В. Логинов, Е. В. Харюткина, Е. И. Морару // География и природные ресурсы. 2014. № 4. С. 13–21.

**Ипполитов, И. И.** Климат: структура и динамика метеорологических величин на Азиатской территории России за 1975–2012 гг. / И. И. Ипполитов, С. В. Логинов, Е. В. Харюткина // География Сибири в начале XXI века. Т. 2. Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2015. С. 117–137.

**Касимов, Н. С.** Регионы России: локальные последствия глобального потепления / Н. С. Касимов, А. В. Кислов, В. Л. Бабурин // Экология и жизнь. 2012. № 8. С. 72–77.

**Киселев, М. В.** Сравнительный анализ результатов измерения температуры почвогрунтов с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса и вытяжных термометров / М. В. Киселев, Н. Н. Воропай // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 21–23 марта 2018 г. – Иркутск, 2018. – С. 551–554. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

**Климова, О. В.** Влияние климата на гидрологические и гидрохимические процессы рек Горного Алтая / О. В. Климова, В. А. Семенов, И. В. Семенова, Т. В. Авдюшкина, Р. А. Аванесян, Д. О. Куспаков, Е. Г. Каткова // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: сборник научных трудов SWorld по материалам международной научно-практической конференции. 2011. Т. 1. С. 92–96.

**Кононова, Н. К.** Влияние циркуляции атмосферы Северного полушария на формирование стихийных бедствий на территории России в XXI веке / Н. К. Кононова // ГеоРиск. 2014. № 3. С. 22–27.

**Кононова, Н. К.** Колебания циркуляции атмосферы в Западной Сибири и наводнение на Алтае в 2014 году / Н. К. Кононова // XI Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: сборник трудов конференции. Томск, 21–23 сентября 2015 г. Томск, 2015. С. 41–42.

**Кузьмин, В. А.** Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока / В. А. Кузьмин, А. В. Дикинис // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 16–27.

**Кураков, С. А.** Автономный измеритель профиля температуры АИПТ. / С. А. Кураков, В. А. Крутиков, В. Г. Ушаков // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 166–167.

**Кураков, С. А.** Система автономного мониторинга состояния окружающей среды / С. А. Кураков // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.

**Лубенец, Л. Ф.** Роль антропогенных модификаций в ландшафтно-гидрологической организации бассейна р. Майма / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Вестник Волгоградского государственного университета. 2015. Т. 11, № 1. С. 61–68.

**Лубенец, Л. Ф.** Исследование основных характеристик снежного покрова ландшафтно-гидрологических комплексов бассейна реки Майма в зимний

период 2014/15 года / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных, О. П. Николаева // Известия АО РГО. 2016. Т.40, № 1. С. 34–40.

**Лубенец, Л. Ф.** Современные ландшафты бассейна р. Майма (низкогорья Русского Алтая) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Proceedings International Conference «Landscape Dimensions of Sustainable Development: Science – Planning – Governance»: тезисы международной конференции. Тбилиси, 4–6 октября 2017 г. Тбилиси, 2017. С. 74–79.

**Лубенец, Л. Ф.** Ландшафтные основы дифференциации снежного покрова в бассейне р. Майма (низкогорья Русского Алтая) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции. Тюмень–Тобольск, 22–25 августа 2017 г.– Тюмень, 2017. Т. 2. С. 373–376.

**Лубенец, Л. Ф.** Особенности пространственной дифференциации снежного покрова в низкогорных ландшафтах Русского Алтая (на примере бассейна р. Майма) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных, Д. К. Першин // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 1. С. 56–64.

**Лубенец, Л. Ф.** Ландшафтное картографирование бассейна р. Майма (Русский Алтай) / Л. Ф. Лубенец, Черных Д. В. // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. № 11. С. 15–24.

**Лубенец, Л. Ф.** Сравнительный анализ характеристик снежного покрова в разнотипных низкогорных ландшафтах Русского Алтая (бассейн р. Майма) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных, О. П. Николаева // Ландшафтная география в XXI веке: материалы международной научной конференции «Третьи ландшафтно-экологические чтения, посвященные 100-летию Г. Е. Гришанкова», Симферополь, 11–14 сентября 2018 г. Симферополь, 2018. С. 491–494.

**Лубенец, Л. Ф.** Снегозапасы низкогорных лесостепных и лесных ландшафтов бассейна верхней Оби (р. Майма) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Географические основы и экологические принципы региональной

политики природопользования: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН А. Н. Антипова. Иркутск, 23–27 сентября 2019 г. Иркутск, 2019. С. 156–160.

**Лубенец, Л. Ф.** Внутриландшафтное распределение снегозапасов в бассейне р. Майма (низкогорья Русского Алтая) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Лед и снег. 2019. Т. 59, № 3. С. 319–332.

**Лубенец Л. Ф.** Ландшафтная дифференциация снегонакопления в бассейне р. Майма (низкогорья Русского Алтая) / Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов: материалы XIII международной ландшафтной конференции, посвященной столетию со дня рождения Ф. Н. Милькова. Воронеж, 14–17 мая 2018 г. Воронеж, 2018. С. 215–217.

**Люцигер, А. О.** Межведомственное взаимодействие в рамках мониторинга опасных гидрологических явлений в бассейне Верхней Оби / А. О. Люцигер, Ю. И. Винокуров, Н. В. Люцигер // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III Всероссийской научной конференции с международным участием. Барнаул, 28 августа–1 сентября 2017 г. Барнаул, 2017. Т. 4. С. 51–66.

**Министерство природных ресурсов**, экологии и имущественных отношений Республики Алтай. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2016 году». (Электронный ресурс). – URL: http://www.altai-republic.ru/society/doklad_nature_2016.pdf (дата обращения 12.2018).

**Министерство природных ресурсов**, экологии и имущественных отношений Республики Алтай. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2017 году». (Электронный ресурс). – URL: https://mpr-ra.ru/docs/nedra-info/Doklad_2017.pdf (дата обращения 09.2018).

**Мирвис, В. М.** Изменения в режиме оттепелей на территории России / В. М. Мирвис, И. П. Гусева // Труды ГГО, 2007. № 556. С. 101–115.

**Михайлов, В. Н.** / Гидрология: учебник для вузов / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов // 2-е изд. испр. М. : Высш. школа, 2005. 463 с.

**Модина, Т. Д.** Климат и агроклиматические ресурсы Алтая. / Т. Д. Модина, М. Г. Сухова // Новосибирск : Универсальное книжное издательство. 2007. 180 с.

**Научно-практический журнал** "Инженерная защита" // А. А. Косачёв, Наводнение в Алтайском крае. 2014. (Электронный ресурс). – URL: http://territoryengineering.ru/vyzov/navodnenie-v-altajskom-krae (дата обращения 11.2017).

**Николаева, О. П.** Построение картографических моделей климатического фона бассейна р. Майма [Электронный ресурс] / О. П. Николаева, М. Г. Сухова // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. Т. 9, № 113. 2015. (Электронный ресурс). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-kartograficheskih-modeley-klimaticheskogo-fona-basseyna-r-mayma (дата обращения 10.2019).

**Новаковский, Б. А.** Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийск, Алтайский край) / Б. А. Новаковский, О. Н. Колесникова, А. И. Прасолова, Р. В. Пермяков // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 15–20.

**Новости Горного Алтая** [Электронный ресурс] // Общий ущерб от наводнения в республике оценили в 6,5 млрд – Режим доступа: http://www.gorno-altaisk.info/news/31116 (дата обращения 04.2019).

**Онучин, А. А.** Реакция годового стока сибирских рек на климатические и антропогенные изменения / А. А. Онучин // Гидрологические последствия изменений климата: труды Британско-Российской конференции. Новосибирск, 13–15 июля 2007 г. Барнаул, 2009. С. 179–181.

**Паромов, В. В.** Внутригодовой режим стока рек Алтае-Саянской горной области в условиях климатических изменений / В. В. Паромов, Л. Н. Шантыкова // Водные и экологические проблемы Сибири и

Центральной Азии: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летнему юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 20–24 августа 2012 г. Барнаул, 2012. Т. 1. С. 121–125.

**Погода и климат** // Прогноз погоды в Кызыл-Озёке. (Электронный ресурс). – URL: http://www.pogodaiklimat.ru (дата обращения 08.2019).

**Природные комплексы** Майминского района Республики Алтай: коллективная монография / А. В. Шитов, А. И. Минаев, Н. В. Федоткина, М. Г. Сухова, О. В. Журавлева, Т. Д. Модина, Р. О. Собчак, О. В. Папина, Н. А. Кочеева, А. Н. Дмитриев, О. И. Банникова, О. В. Климова, Т. И. Мананкова, Ю. В. Робертус, В. Е. Кац, М. С. Доставалова, Ю. П. Малков, П. Ю. Малков, А. Н. Малкова, Н. П. Малков, И. А. Машошина, И. А. Ильиных, А. А. Дивак, С. А. Северова, Е. Д. Веселовский, Р. А. Аванесян, А. В. Каранин, С. С. Драчев // Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2006. 200 с.

**Пузанов, А. В.** Водопроницаемость горно-лесных и степных почв Алтая как фактор выщелачивания макроионов (модельный эксперимент в почвенных колонках) / А. В. Пузанов, С. В. Бабошкина, Т. А. Рождественская, С. Н. Балыкин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. Т. 117, № 7. С. 48–55.

**Пузанов, А. В.** Восстановление расчетными методами основной гидрофизической характеристики и сравнение водоудерживающей способности степных (бассейн реки Алей) и горнолесных (бассейн реки Майма) почв Алтая / А. В. Пузанов, С. В. Бабошкина, Т. А. Рождественская, С. Н. Балыкин, И. В. Егорова, С. С. Мешкинова // Мир науки, культуры, образования. 2014. Т. 69, № 6. С. 572–578.

**Пузанов, А. В.** Гидролого-гидрохимические аспекты поверхностного стока в бассейне р. Майма (Горный Алтай) / А. В. Пузанов, Ю. В. Робертус, Р. В. Любимов, А. В. Кивацкая // Проблемы региональной экологии. 2015. № 1. С. 49–55.

**Республика Алтай:** Атлас. Новосибирск: ФГУП «Новосибирская картографическая фабрика», 2008. 84 с.

**Ресурсы поверхностных вод СССР** / ред. В. А. Семенова. –Л: Гидрометеорологическое издательствово, 1969. Т. 15, Вып. 1, Ч. 1. 316 с.

**Решетько, М. В.** Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири / М. В. Решетько, Ю. А. Моисеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 4. С. 108–118.

**Робертус, Ю. В.** К проблеме гидроэкологической безопасности на территории Республики Алтай / Ю. В. Робертус // Экологические аспекты природопользования в Алтае-Саянском регионе: материалы международной научно-практической конференции. Барнаул, 1–8 августа 2014 г. Барнаул, 2014. С. 39–44.

**Робертус, Ю. В.** Особенности прохождения аномального паводка 2014 г. на территории Республики Алтай / Ю. В. Робертус, М. С. Достовалова, Р. В. Любимов. // Природные ресурсы Горного Алтая. Геология, геофизика, гидрогеология, геоэкология, минеральные и водные ресурсы. 2014. Т. 1, № 18. С. 57–62.

**Робертус, Ю. В.** Нетрадиционный подход к прогнозу весеннего паводка на реках Горного Алтая / Ю. В. Робертус, М. С. Достовалова, Р. В. Любимов // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III Всероссийской научной конференции с международным участием. Барнаул, 28 августа–1 сентября 2017 г. Барнаул, 2017. Т. 2. С. 187–192.

**Романов, А. Н.** Космический микроволновый мониторинг опасных гидрологических явлений на юге Западной Сибири: монография / А. Н. Романов, А. О. Люцигер, Д. Н. Трошкин, И. В. Хвостов, П. Н. Уланов, Н. В. Люцигер // Издательство ООО «Пять плюс». Барнаул, 2017. 109 с.

**Ротанова, И. Н.** Анализ предпосылок наводнений в бассейне реки Чарыш с применением геоинформационного картографирования / И. Н. Ротанова, В. А. Обласов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 7. С. 9–15.

**Рычков, В. М.** О борьбе с наводнениями на Алтае / В. М. Рычков, С. И. Рычкова // Природные ресурсы Горного Алтая. Геология, геофизика, гидрогеология, геоэкология, минеральные и водные ресурсы. 2015. № 19. С. 1–2.

**Севастьянов, В. В.** Климат высокогорных районов Алтая и Саян. / В. В. Севастьянов // Томск: Издательство Томского госуниверситета, 1998. 201 с.

**Семенов, В. А.** Климатически обусловленные изменения опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на реках России / В. А. Семенов // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 74–83.

**Семёнов, В. А.** Климатическая обусловленность экстремальности гидрологических явлений на реках и экологического состояния рек и водоёмов в горах юга Сибири / В. А. Семёнов, И. В. Семёнова, Т. В. Больбух, Е. И. Авдюшкина // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летнему юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 20–24 августа 2012 г. Барнаул, 2012. Т. 1. С. 135–139.

**Семенов, В. А.** География климатообусловленных изменений опасных наводнений на реках России в конце XX – начале XXI столетий / В. А. Семенов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. № 177. С. 160–174.

**Сомов, Н. В.** Асинхронность колебаний речного стока крупных рек СССР / Н. В. Сомов // Метеорология и гидрология. 1963. № 5. С. 14–21.

**Сухова, М. Г.** Современные изменения температурного режима воздуха и режима увлажнения на Алтае, как проявление регионального изменения климата / М. Г. Сухова, Т. Д. Модина // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 2. С. 14–18.

**Сухова, М. Г.** Причины возникновения экстремальных гидрологических ситуаций на реках Республики Алтай / Н. А. Кочеева, О. В. Журавлева, А. А. Бакулин, Ю. Н. Никольченко // Геология, география и глобальная энергия. 2015. № 4. С. 48–59.

**Харламова, Н. Ф.** Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона: монография. / Н. Ф. Харламова. // Издательство АлтГУ, 2013. 156 с.

**Харламова, Н. Ф.** Факторы формирования чрезвычайных гидрологических ситуаций в бассейнах малых рек предгорно-низкогорной зоны Алтая / Н. Ф. Харламова, А. В. Плехова // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования. Барнаул, 20–24 октября 2015 г. Барнаул, 2015. С. 1407–1410.

**Черных, Д. В.** Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай) Карта. М 1:500000 // Д. В. Черных, Г. С. Самойлова. Новосибирск : ФГУП Новосибирская картографическая фабрика, 2011.

**Шикломанов, И. А.** Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России / И. А. Шикломанов, В. Ю. Георгиевский // Гидрологические последствия изменений климата: труды Британско-Российской конференции. Новосибирск, 13–15 июля 2007 г. Барнаул, 2009. С. 143–151.

**Шмакин, А. Б.** Климат Алтае-Саянского эко региона, его современные и возможные в будущем изменения / А. Б. Шмакин, Н. Ф. Харламова, Т. В. Яшина, М. Г. Сухова, А. Ю. Михайлов, О. В. Останин // Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии: материалы международной научной конференции. Иркутск, 7–21 сентября 2012 г. Иркутск, 2012. Т. 1. С. 112–117.

**Экстремальные** гидрологические ситуации / отв. ред. Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова, И. С. Зайцева. М. : ООО «Медиа-ПРЕСС», 2010. 464 с.

**Adams III, T. E.** Possible hydrologic forecasting improvements resulting from advancements in precipitation estimation and forecasting for a real-time flood forecast system in the Ohio River Valley, USA / T. E. Adams III, R. L. Dymond // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 579. P. 124138.

**Amengual, A.** Potential of a probabilistic hydrometeorological forecasting approach for the 28 September 2012 extreme flash flood in Murcia, Spain / A. Amengual, V. Homar, O. Jaume // Atmospheric Research. 2015. Vol. 166. P. 10–23.

**Anemometer for** Weather Monitor or Wizard. (Электронный ресурс). – URL: https://www.davisinstruments.com/product/anemometer-for-weather-monitor-or-wizard/ (дата обращения 08.2019).

**Azam, M.** Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea / M. Azam, H. San Kim, S. J. Maeng // International journal of disaster risk reduction. 2017. Vol. 21. P. 11–26.

**Borga, M.** On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins / M. Borga, E. N. Anagnostou, E. Frank // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2000. Vol. 105, № D2. P. 2269–2280.

**Botai, C.** Hydrometeorological research in South Africa: A review / C. Botai, J. Botai, S. Muchuru, I. Ngwana // Water. 2015. Vol. 7, № 4. P. 1580–1594.

**Chanson, H.** Human body stability in floodwaters: the 2011 flood in Brisbane CBD / H. Chanson, R. Brown, D. McIntosh // 11th National Conference on Hydraulics in Civil Engineering & 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes. Engineers Australia, 2014. P. 294–304.

**Cloke, H. L.** Ensemble flood forecasting: A review / H. L. Cloke, F. Pappenberger // Journal of hydrology. 2009. Vol. 375, № 3–4. P. 613–626.

**Corral, C.** Comparison of two early warning systems for regional flash flood hazard forecasting / C. Corral, M. Berenguer, D. Sempere-Torres, L. Poletti, F. Silvestro, N. Rebora // Journal of hydrology. 2019. Vol. 572. P. 603–619.

**Groisman P. Ya.** Climate changes in Siberia / P. Ya. Groisman, T. A. Blyakharchuk, A. V. Chernokulsky, M. M. Arzhanov, L. B. Marchesini,

E. G. Bogdanova, I. I. Borzenkova, O. N. Bulygina, A. A. Karpenko, L. V. Karpenko, R. W. Knight, V. Ch. Khon, G. N. Korovin, A. V. Meshcherskaya, I. I. Mokhov, E. I. Parfenova, V. N. Razuvaev, N. A. Speranskaya, N. M. Tchebakova, N. N. Vygodskaya // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. P. 57–109.

**Demeritt, D.** The European Flood Alert System and the communication, perception, and use of ensemble predictions for operational flood risk management / D. Demeritt, S. Nobert, H. L. Cloke, F. Pappenberger // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27, № 1. P. 147–157.

**Davis, R. S.** Flash flood forecast and detection methods / R. S. Davis // Severe convective storms. – American Meteorological Society, Boston, MA, 2001. P. 481–525.

**Edouard, S.** Ensemble-based flash-flood modelling: Taking into account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties / S. Edouard, B. Vincendon, V. Ducrocq // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 560. P. 480–494.

**Freescale Sensors.** Integrated Pressure Sensor. (Электронный ресурс). – URL: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXA6115A.pdf (дата обращения 08.2019).

**Gergel, S. E.** Consequences of human-altered floods: levees, floods, and floodplain forests along the Wisconsin River / S. E. Gergel, M. D. Dixon, M. G. Turner // Ecological applications. 2002. Vol. 12, № 6. P. 1755–1770.

**Honeywell.** HIH-4010/4020/4021 Series. Humidity Sensors. (Электронный ресурс). – URL: https://www.tme.eu/Document/8933ab7ccf739e3c41713808a5f3bafb/hih-4010.pdf (дата обращения 08.2019).

**Hossain, F.** Improving flood forecasting in international river basins / F. Hossain, N. Katiyar // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2006. Vol. 87, № 5. P. 49–54.

**Javelle, P.** Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations / P. Javelle, C. Fouchier, P. Arnaud, J. Lavabre // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 394, № 1–2. P. 267–274.

**Jeong, J.** Comparative applications of data-driven models representing water table fluctuations / J. Jeong, E. Park // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 572. P. 261–273.

**Kazama, S.** Evaluation of groundwater resources in wide inundation areas of the Mekong River basin / S. Kazama, T. Hagiwara, P. Ranjan, M. Sawamoto // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 340, № 3–4. P. 233–243.

**Kiselev, M. V.** Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring / M. V. Kiselev, N. N. Voropay, E. A. Dyukarev, S. A. Kurakov, P. S. Kurakova, E. A. Makeev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 190. P. 012031.

**Komma, J.** Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting / J. Komma, G. Blöschl, C. Reszler // Journal of Hydrology. 2008. Vol. 357, № 3–4. P. 228–242.

**Kouwen, N.** WATFLOOD: a micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar / N. Kouwen // Canadian Water Resources Journal. 1988. Vol. 13, № 1. P. 62–77.

**Leedal, D.** Visualization approaches for communicating real-time flood forecasting level and inundation information / D. Leedal, J. Neal, K. Beven, P. Young, P. Bates // Journal of Flood Risk Management. 2010. Vol. 3, № 2. P. 140–150.

**Li, L.** Evaluation of the real-time TRMM-based multi-satellite precipitation analysis for an operational flood prediction system in Nzoia Basin, Lake Victoria, Africa / L. Li, Y. Hong, J. Wang, R. F. Adler, F. S. Policelli, S. Habib, D. Irwn, T. Korme, L. Okello // Natural hazards. 2009. Vol. 50, № 1. P. 109–123.

**Lu, G.** Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River Basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system / G. Lu, Z. Wu, L. Wen, C. Lin, J. Zhang, Y. Yang // Science in China Series E: Technological Sciences. 2008. Vol. 51, № 7. P. 1049–1063.

**Martinis, S.** Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data / S. Martinis, A. Twele, S. Voigt // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2009. Vol. 9, № 2. P. 303–314.

**Modrick, T. M.** The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change / T. M. Modrick, K. P. Georgakakos // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2015. Vol. 3. P. 312–336.

**Moore, R. J.** Forecasting for flood warning / R. J. Moore, V. A. Bell, D. A. Jones // Comptes Rendus Geoscience. 2005. Vol. 337, № 1–2. P. 203–217.

**Morsy, M. M.** A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems / M. M. Morsy, J. L. Goodall, G. L. O'Neil, J. M. Sadler, D. Voce, G. Hassan, C. Huxley // Environmental modelling & software. 2018. Vol. 107. P. 231–244.

**Nikolopoulos, E. I.,** Anagnostou, E. N., Borga, M., Vivoni, E. R., Papadopoulos, A. Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability / E. I. Nikolopoulos, E. N. Anagnostou, M. Borga, E. R. Vivoni, A. Papadopoulos // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 402, № 3–4. P. 165–178.

**Prigent, C.** Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000 / C. Prigent, F. Papa, F. Aires, W. B. Rossow, E. Matthews // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2007. Vol. 112. P. D12107.

**Pritchard, R. W.** 2011 to 2012 Queensland floods and cyclone events: Lessons learnt for bridge transport infrastructure / R. W. Pritchard // Australian Journal of Structural Engineering. 2013. Vol. 14, № 2. P. 167–176.

**Rain Collector II.** Installation manual. (Электронный ресурс). – URL: https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/manuals/07395-275_IM_07852.pdf (дата обращения 08.2019).

**Sayama, T.** Rainfall–runoff–inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin / T. Sayama, G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka, K. Fukami // Hydrological Sciences Journal. 2012. Vol. 57, № 2. P. 298–312.

**Silvestro, F.** Impact-based flash-flood forecasting system: Sensitivity to high resolution numerical weather prediction systems and soil moisture / F. Silvestro, L. Rossi, L. Campo, A. Parodi, E. Fiori, R. Rudari, L. Ferraris // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 572 P. 388–402.

**Smith, L. C.** Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review / L. C. Smith // Hydrological processes. 1997. Vol. 11, № 10. P. 1427–1439.

**Sunkpho, J.** Real-time flood monitoring and warning system / J. Sunkpho, C. Ootamakorn // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2011. Vol. 33, № 2. p. 227–235.

**Syvitski, J. P. M.** Sinking deltas due to human activities / J. P. M. Syvitski, A. J. Kettner, I. Overeem, E. W. Hutton, M. T. Hannon, G. R. Brakenridge, J. Day, C. Vörösmarty, Y. Saito, L. Giosan, R. J. Nicholls // Nature Geoscience. 2009. Vol. 2, № 10. P. 681.

**Tao, J.** Prospects for flash flood forecasting in mountainous regions–An investigation of Tropical Storm Fay in the Southern Appalachians / J. Tao, A. P. Barros // Journal of hydrology. 2013. Vol. 506. P. 69–89.

**Toth, E.** Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting / E. Toth, A. Brath, A. Montanari // Journal of hydrology. 2000. Vol. 239, № 1–4. P. 132–147.

**Townsend, P. A.** Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing / P. A. Townsend, S. J. Walsh // Geomorphology. 1998. Vol. 21, № 3–4. P. 295–312.

**TRIME-PICO 32:** sensor with integrated TDR electronics. (Электронный ресурс). – URL: https://www.imko.de/en/trime-pico-32/ (дата обращения 08.2019).

**Van Der Nat, D.** Inundation dynamics in braided floodplains: Tagliamento River, northeast Italy / D. Van Der Nat, A. P. Schmidt, K. Tockner, P. J. Edwards, J. V. Ward // Ecosystems. 2002. Vol. 5, № 7. P. 0636–0647.

**Zuev, V. V.** Water level regime of the Maima river (Mountain Altai) in the context of modern climate changes / V. V. Zuev, E. M. Korotkova, V. A. Uymanova, A. V. Pavlinskiy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012072.