

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Барнаул – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Барышников Геннадий Яковлевич,**
доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», Кафедра природопользования и геоэкологии, профессор

Болгов Михаил Васильевич,
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится «22» июня 2021 г. в 10 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 003.008.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН) по адресу: 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Факс: (3852) 240396. E-mail: iwep@iwep.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем СО РАН и на сайте организации <http://iwep.ru>

Автореферат разослан «___» апреля 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу Института на имя ученого секретаря Совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.008.01,
кандидат географических наук, доцент



Рыбкина И.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 ЧС 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 паводья, 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 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 организована 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, определена научная новизна и научная и практическая значимость работы.

В **первой главе** диссертации представлена общая физико-географическая характеристика бассейна р. Майма. Выбор 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).

В **разделе 1.1** рассмотрено географическое положение, геологическое строение и рельеф. Река Майма находится на севере Республики Алтай, является правым притоком Катуня, входит в систему Верхней Оби (Атлас, 1978). Длина реки 57 км, площадь водосборного бассейна 780 км² (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969). Верхняя часть бассейна занимает среднегорный, а нижняя – низкогорный районы (Природные комплексы..., 2006).

В **разделе 1.2** описаны климатические условия исследуемого бассейна. Климат региона резко континентальный. По данным одной длительно функционирующей метеостанции в бассейне (с. Кызыл-Озёк) среднегодовая температура воздуха составляет +1 °С, годовая сумма осадков – 795 мм. Исследуемый бассейн отличается теплым и влажным летом, снежными и

сравнительно мягкими зимами (Севостьянов, 1998; Золотов, Николаева и др., 2012).

Раздел 1.3 посвящен гидрологической характеристике бассейна. Гидрологический район обладает густой сетью малых рек с постоянным стоком и преобладающим снего-дождевым питанием при доле грунтового питания около 20 % (Пузанов и др., 2015). Имеется один водомерный пост, находящийся в замыкающем створе с. Майма, примерно в 2 км от впадения реки в Катунь. Среднегодовой расход воды 8,47 м³/с, среднемноголетний уровень во время половодья 3,4 м, скорость течения варьируется от 1 до 3 м/с (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1969). По типу водного режима р. Майма относится к рекам с весенним половодьем и летними паводками (Пузанов и др., 2015).

В **разделе 1.4** описана характеристика почвенно-растительного покрова. Водосборный бассейн р. Майма представлен преимущественно горно-лесными темно-серыми почвами под смешенными березово-пихтовыми лесами (Пузанов и др., 2014).

В **разделе 1.5** рассмотрена антропогенная нагрузка бассейна. Согласно А. В. Пузанову с соавт. (2015), максимум антропогенной нагрузки на р. Майма приходится на агломерацию г. Горно-Алтайска. Высокая степень загрязнения грунтовых вод в районе с. Майма и с. Кызыл-Озёк объясняется слабо развитой сетью коммунально-бытовых услуг.

Во **второй главе** изложенный материал посвящен исследованию гидрологического режима реки Майма в условиях современного изменения климата.

В **разделе 2.1** приведен анализ сезонной и годовой динамики температуры воздуха и осадков.

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 (табл. 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 (табл. 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).

Таблица 1 – Средние многолетние значения температуры воздуха и количества осадков

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Температура, °C	-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, °C/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 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 (рис. 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. (рис. 2).

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, 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. Так, например, повышение температуры воздуха в период 1976–2016 гг. относительно климатической нормы в среднем за год составляют 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).

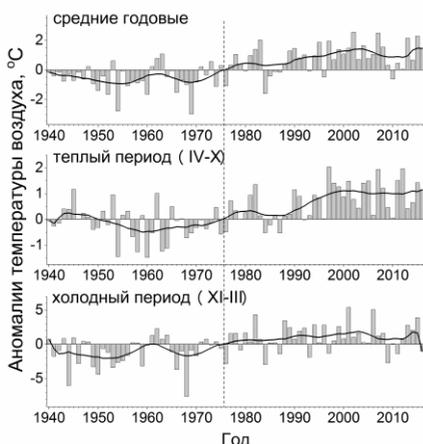


Рисунок 1 – Годовые и сезонные аномалии средней температуры воздуха относительно климатической нормы 1961–1990 гг., сглаженные 11-тилетним скользящим средним

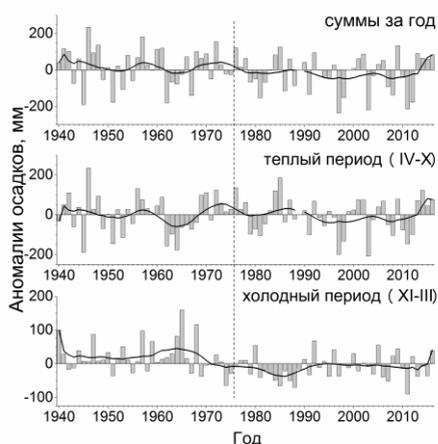


Рисунок 2 – Годовые и сезонные аномалии суммарных осадков относительно климатической нормы 1961–1990 гг., сглаженные 11-тилетним скользящим средним

Раздел 2.2 посвящен водному режиму реки Майма. Показано изменение годового и сезонного стока.

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).

В разделе 2.3 описан урочный режим реки Майма. Приведен анализ максимального уровня половодья, минимального уровня летне-осенней межени и максимального зимнего уровня и доказывается **первое защищаемое положение**.

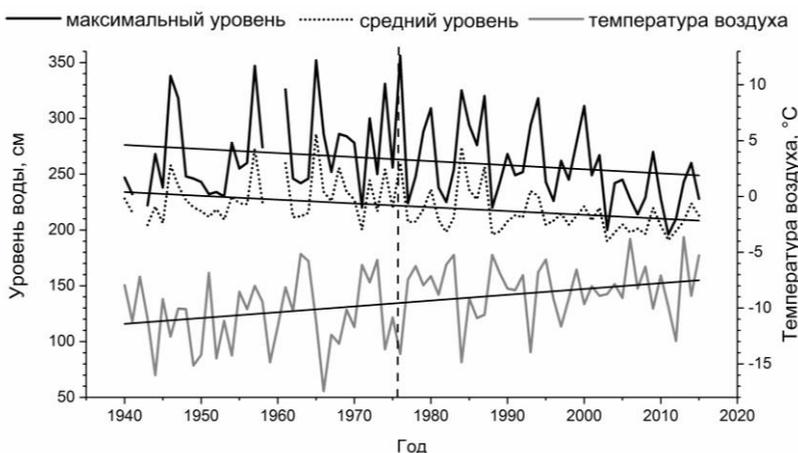


Рисунок 3 – Динамика максимального и среднего уровня воды и средней температуры воздуха в ноябре–декабре, линейные тренды

Исследования показали, что 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). На Рисунке 3 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 участвовавшие периоды с оттепелями, когда река получает дополнительное снеговое питание (Zuev et al., 2018).

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции максимальных средних многолетних уровней воды и температуры воздуха

Период	N	Максимальный средний уровень воды (XI–XII), см	Средняя температура воздуха, °C		Средний уровень воды (XI–XII)	
			VII–X	XI–XII	Температура воздуха (VII–X)	Температура воздуха (XI–XII)
1940–2015	76	262,5	0,3	-0,2	-0,39	-0,35
1940–1975	36	268	-0,1	-1,4	-0,34	-0,18
1976–2015	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 (рис. 3). 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 (табл. 2). 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 (табл. 2). Так, при общем повышении температур воздуха наблюдается снижение максимальных зимних уровней воды, что свидетельствует о меньшем шугообразовании (Zuev et al., 2018).

В разделе 2.4 доказываемся **второе защищаемое положение**; материал посвящен характеристике ледового режима.

Динамика продолжительности ледостава (рис. 4), дат вскрытия и замерзания реки (рис. 5) в многолетнем периоде показывает, что потепление зим сказывается на ледовом режиме: наблюдается сокращение продолжительности ледостава, смещение дат замерзания реки – на более поздние, а дат вскрытия – на более ранние. Так, с 1976 года значительно

возросла изменчивость дат вскрытия и замерзания реки, что отразилось и на изменчивости продолжительности ледостава. 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 2,4 раза (табл. 3). 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 (табл. 3).



Рисунок 4 – Динамика средней температуры воздуха холодного периода и продолжительности ледостава р. Майма

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).

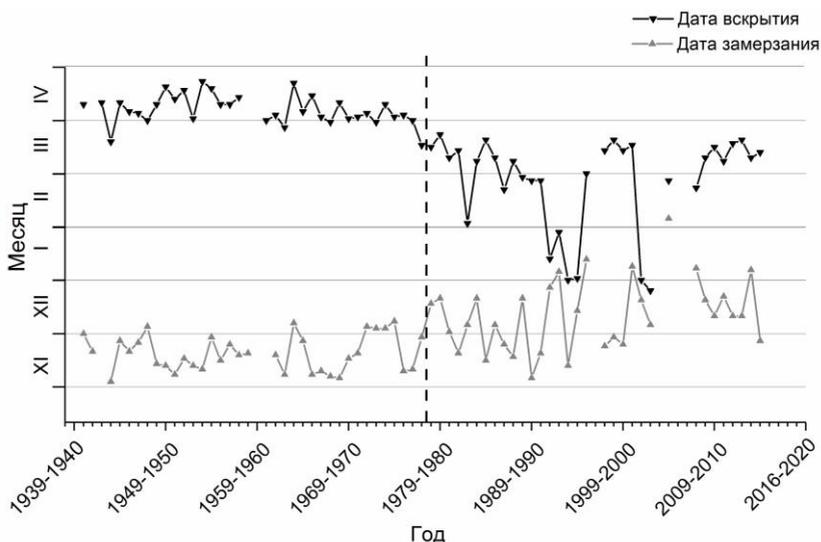


Рисунок 5 – Динамика дат вскрытия и замерзания р. Майма

Таблица 3 – Характеристика ледового режима реки Майма

Период	Средняя температура воздуха холодного периода, °С	Средняя продолжительность ледостава, дни	СКО дней	Средняя дата замерзания	СКО дней	Средняя дата вскрытия	СКО дней
1940-2015	-10,8	95	-	29 ноября	-	16 марта	-
1940-1975	-12	140	11	19 ноября	13	6 апреля	8
1976-2015	-9,8	58	19	10 декабря	39	25 февраля	32

*СКО – среднеквадратическое отклонение

В **третьей** главе изложенный материал посвящен современному комплексному мониторингу гидрометеорологических процессов реки Майма.

В **разделе 3.1** описаны автономный комплекс «Майма» и его технические характеристики.

Автономный комплекс установлен и функционирует в бассейне реки Майма уже больше четырех лет. 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) (рис. 6). Гидрометеорологическая информация с АК «Майма» регистрируется и передается на сервер Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН г. Томска (ИМКЭС СО РАН) каждый час. 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.

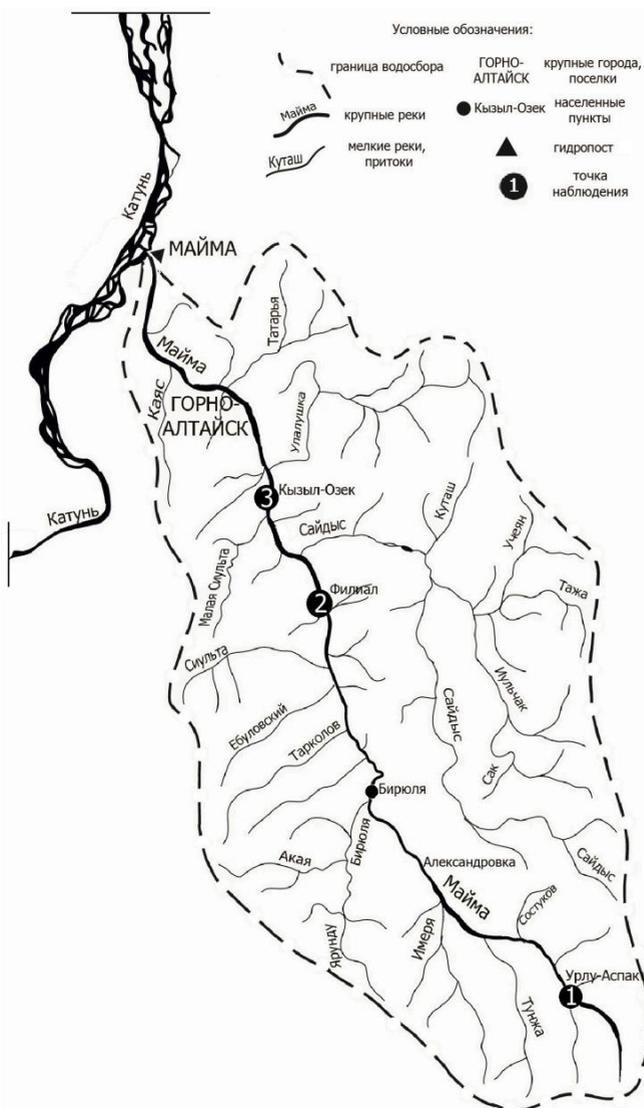


Рисунок 6 –
Картосхема
бассейна р. Майма
(расположение
измерительных
точек АК «Майма»)

В разделе 3.2 приведен сравнительный анализ гидрометеорологических характеристик наблюдений Росгидромета и АК «Майма» за 2017 г. 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. В результате проделанного сравнительного анализа выявлено, что, получаемая с помощью АК «Майма» гидрометеорологическая информация, является репрезентативной и согласуется с официальными данными Росгидромета. Не смотря на значимость различий температурных данных на метеостанции в с. Кызыл-Озёк и АК «Майма», обусловленных антропогенным фактором в зимний период, коэффициент корреляции ($r = 0,99$, $n=364$) свидетельствует об очень сильной связи между параметрами. Пространственные вариации в распределении осадков ослабляют корреляционную связь между рядами ежедневного количества осадков ($r = 0,71$, $n=201$), однако, в соответствии с критерием знаков наблюдаемые различия являются статистически незначимыми с доверительной вероятностью 0,95. Очень сильная корреляционная связь ($r = 0,92$, $n=233$) 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).

В разделе 3.3 доказывается **третье защищаемое положение**; изложенный материал посвящен комплексной оценке гидрометеорологических характеристик половодья в 2016, 2017 и 2018 гг. на основе данных АК «Майма».

Выявлено, что в течение трех лет наблюдений сроки начала половодья фактически совпадали (22–26 марта). 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. 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. 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 (рис. 7).

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). 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 (влажность составляла около 43 %). 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 (Зуев и др., 2020а).

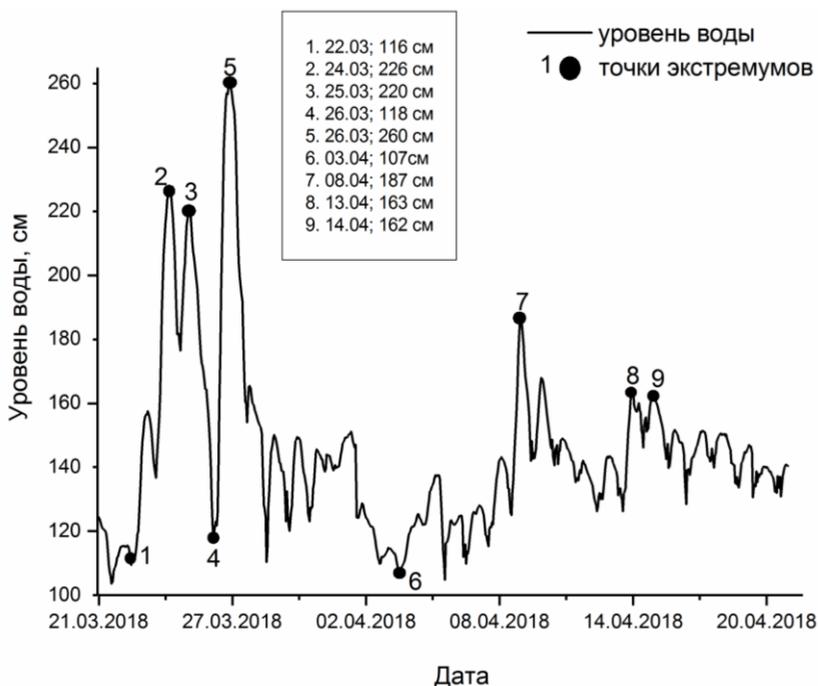


Рисунок 7 – Ряды почасовых значений уровня воды в реке Майма по АК «Майма»

На Рисунках 8–9 показана динамика гидрометеорологической ситуации в среднем течении р. Майма в п. № 3 за период с 1 марта по 20 апреля 2017 (рис. 8) и 2018 гг. (рис. 9). Из графиков видно, что АК позволяет определять инфильтрационное состояние 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. 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).

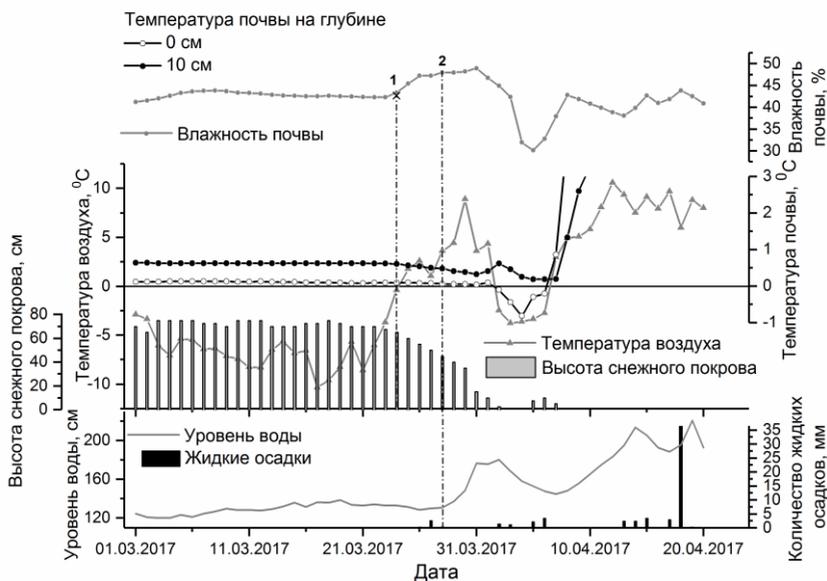


Рисунок 8 – Комплексный график данных по пункту наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) с 1 марта по 20 апреля 2017 (уровень воды по п. № 2);
1 – начало периода интенсивного снеготаяния, 2 – начало формирования первого пика половодья

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). 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).

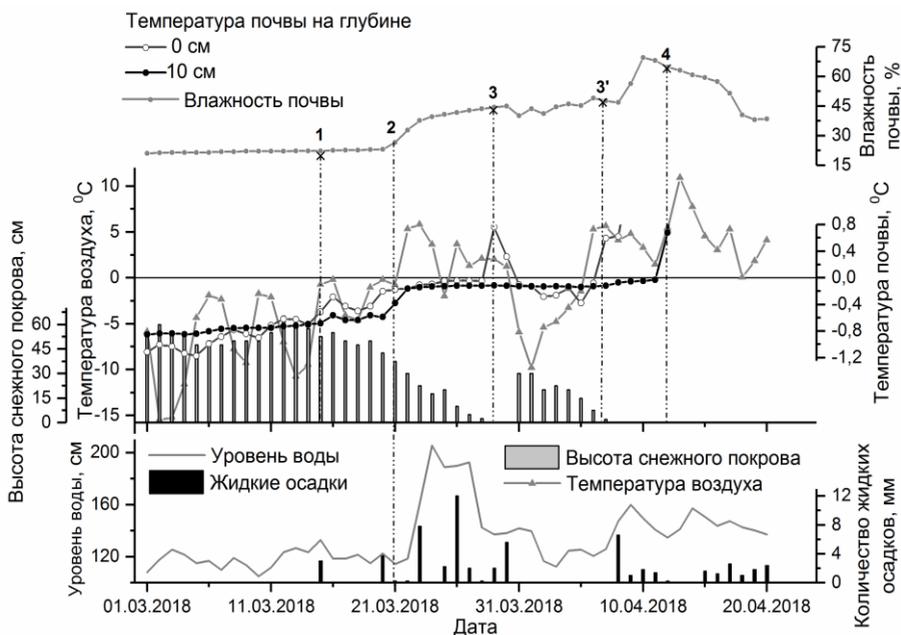


Рисунок 9 – Комплексный график данных по пункту наблюдения № 3 (с. Кызыл-Озёк) с 1 марта по 20 апреля 2018 (уровень воды по п. № 2); 1 – начало периода интенсивного снеготаяния, 2 – начало формирования первого пика половодья, 3, 3' – дата перехода через 0 °C температуры верхнего слоя почвы, 4 – дата перехода через 0 °C температуры почвы на глубине 10 см

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристика региональных природных особенностей рассматриваемого водосбора, исследование внутrigодовой 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 уровня 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК:

- 1) Зуев В. В., Кураков С. А., **Уйманова В. А.** Комплексный мониторинг погодно-климатического и гидрологического режима бассейна р. Майма (Горный Алтай): первые результаты // Ползуновский вестник. 2017. № 3. С. 70–75.
- 2) Зуев В. В., Короткова Е. М., **Уйманова В. А.**, Кураков С. А. Сравнительный анализ гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и автономного измерительного комплекса «Майма» в бассейне р. Майма (Горный Алтай) // Водное хозяйство России. 2018. №5. С. 65–74.
- 3) Зуев В. В., Короткова Е. М., **Уйманова В. А.** Водный и ледовый режим реки Майма (Горный Алтай) в условиях современных изменений климата // Водное хозяйство России. 2019. №5. С. 25–39.
- 4) Зуев В. В., Зуева Н. Е., **Уйманова В. А.**, Кураков С. А. Комплексная оценка инфильтрационных свойств почв и гидрометеорологического режима бассейна реки Майма, Горный Алтай // Водное хозяйство России. 2020. №2. С. 118–134.
- 5) Зуев В. В., Зуева Н. Е., **Уйманова В. А.** Роль синхронных наблюдений в мониторинге гидрометеорологического режима на примере бассейна реки Майма, Горный Алтай // Проблемы региональной экологии. 2020. №4. С. 43–47.

Публикации в других научных изданиях:

- 6) Zuev V. V., Korotkova E. M., **Uymanova V. A.**, Pavlinskiy A. V. Water level regime of the Maima river (Mountain Altai) in the context of modern climate changes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012072.
- 7) Зуев В. В., Кураков С. А., **Уйманова В. А.** Комплексный мониторинг бассейна р. Майма (Горный Алтай): первые результаты // XII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. Томск, 17–20 октября 2017 г. Томск, 2017. С. 43–44.
- 8) Зуев В. В., Кураков С. А., **Уйманова В. А.** Мониторинг уровня режима р. Майма, Горный Алтай // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 4 т. Барнаул, 28 августа–1 сентября 2017 г. Барнаул, 2017. Т. 2. С. 88–94.
- 9) Зуев В. В., Короткова Е. М., **В. А. Уйманова.** Гидрологический режим реки Майма (Горный Алтай) в условиях современного потепления климата // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы: сборник тезисов 22-й Международной школы-конференции молодых учёных. Майкоп, 23–29 сентября 2018 г. Майкоп, 2018. С. 68.
- 10) Зуев В. В., Короткова Е. М., **Уйманова В. А.**, Харламова Н. Ф.

Климатически обусловленные изменения гидрологического режима р. Майма (Горный Алтай) в период с 1940–2016 гг. // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: труды II Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2018 г. Санкт-Петербург, 2018. С. 299–302.

11) Зуев В. В. , **Уйманова В. А.**, Кураков С. А. Гидрометеорологические наблюдения на р. Майма (Горный Алтай) за 2016–2017 гг. с помощью автоматизированного комплекса ИМКЭС СО РАН (Электронный ресурс) // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 21–23 марта 2018 г. Иркутск, 2018. С. 254–258. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

12) **Уйманова В. А.**, Зуев В. В., Зуева Н. Е., Кураков С. А. Результаты мониторинга гидрометеорологических характеристик автономным измерительным комплексом «Майма» в бассейне р. Майма (Горный Алтай) // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития: сборник научных трудов международной научной конференции. Томск, 12–16 ноября 2018 г. Томск, 2018. С. 276–278.

13) **Уйманова В. А.**, Короткова Е. М., Зуев В. В. Автономный комплекс «Майма» как источник достоверной гидрометеорологической информации // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIRONMENTIS-2018»: Избранные труды. Томск: ИМКЭС СО РАН, 2018. С. 426–428.