

С.В. Борщ
Ю.А. Симонов
А.В. Христофоров

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕК РОССИИ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

Федеральное государственное бюджетное учреждение
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

С.В. Борщ, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА
РЕК РОССИИ**

Москва
2023

УДК 556.06
ББК 26.222
Б84

Рецензент:
член-корреспондент РАН,
доктор географических наук, профессор Е.Ж. Гармаев

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. – М.: Гидрометцентр России, 2023. – 200 с.

ISBN 978-5-9908623-8-8

Приводятся результаты исследования факторов, ограничивающих заблаговременность и точность гидрологических прогнозов. Предлагаются рекомендации по повышению качества прогнозов речного стока, увеличению числа водных объектов, для которых такие прогнозы могут составляться, совершенствованию систем доведения прогностической информации до потребителей и предупреждения об опасных гидрологических явлениях. Даны примеры успешной реализации этих рекомендаций при прогнозировании стока рек России. Рекомендации направлены на повышение научной обоснованности и эффективности осуществления оперативных решений по использованию водных ресурсов и защите от опасных проявлений гидрологического режима рек.

Для специалистов в области гидрологических прогнозов, гидрологии, водного хозяйства, мониторинга окружающей среды и экологии.

S.V. Borsch, Y.A. Simonov, A.V. Khristoforov

Streamflow forecasting in Russia

Results of the study of the factors that limit lead-time and accuracy of hydrological forecasts are described. Recommendations are proposed to improve the quality of streamflow forecasts, increase the number of rivers and forecasting gauges, and improve early warning systems for dissemination and communicating of forecasts and warnings to end-users. Examples and case studies of successful implementation of these recommendations are given with respect to operational streamflow forecasting in Russia.

The recommendations are aimed to increase the scientific validity of water resources management activities and the effectiveness of implementing operational decisions on the use of water resources and protection from dangerous hydrological events.

Intended for specialists in the field of operational hydrological forecasts, hydrology, water resources management, environmental sciences.

ISBN 978-5-9908623-8-8

© ФГБУ «Гидрометцентр России», 2023

ВВЕДЕНИЕ

Научно обоснованное планирование и эффективное проведение мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных явлений, связанных с водным режимом рек, требует достаточно надежных оценок ожидаемой водности рек и притока воды в водохранилища в течение определенного периода времени [8, 44, 111, 124]. В качестве таких оценок используются прогнозы речного стока различной заблаговременности [13, 66, 144]. Несвоевременное доведение таких прогнозов до потребителей и содержащиеся в них ошибки снижают эффективность использования водных ресурсов и защиты населения и хозяйственных объектов при возникновении опасных гидрологических ситуаций. Снижение эффективности выражается недополученной прибылью или дополнительным ущербом, которые будут неизбежно возрастать по мере экономического развития нашей страны [2, 4, 88, 91, 111, 150]. Таким образом, повышение заблаговременности и точности гидрологических прогнозов, совершенствование системы раннего предупреждения об опасных гидрологических явлениях и доведения прогностической информации до ее потребителей является одной из важнейших задач, стоящих перед учреждениями Росгидромета.

Возможности гидрологического прогнозирования ограничены следующими факторами:

1) многофакторностью гидрометеорологических процессов и в частности процессов формирования речного стока на конкретном водосборе;

2) уровнем мониторинга этих процессов, включая конфигурацию наземной сети гидрометеорологических наблюдений, их состав и точность, а также располагаемые средства дистанционного зондирования;

3) неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и возможностями прогнозирования этих элементов;

4) качеством используемой методики гидрологического прогнозирования, включая ее научную обоснованность, информационную обеспеченность и уровень анализа используемой гидрометеорологической информации [2, 13, 124].

В предлагаемой монографии эти факторы анализируются и учитываются в целях повышения возможностей прогнозирования стока рек России и совершенствования системы доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей.

В первой главе рассматриваются виды прогнозов речного стока, факторы, определяющие их заблаговременность и точность. Приводятся методы оценки погрешности прогнозов и их коррекции. Обсуждаются различные подходы к определению эффективности методик прогнозирования речного стока.

Во второй главе излагается подход к получению краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды методом экстраполяции гидрографа, в котором учитываются только известные значения прогнозируемой величины за дату выпуска прогноза и за несколько предыдущих суток.

В третьей главе предлагается более сложная методика краткосрочного прогнозирования расходов воды на основе концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и системы краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru.

В четвертой главе анализируются возможности долгосрочного прогнозирования речного стока, которые ограничиваются неопределенностью хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологического прогноза и недостаточной определенностью пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока. Дана оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность долгосрочных гидрологических прогнозов.

Содержащиеся во второй, третьей и четвертой главах общие положения и рекомендации реализуются в виде конкретных методик прогнозирования стока рек России.

В пятой главе рассматриваются системы подготовки, выпуска прогнозов речного стока и их доведения до всех заинтересованных потребителей, среди которых наибольшее внимание уделено системам раннего предупреждения о паводках и наводнениях. Предлагаются разработанные в ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе мирового опыта системы раннего предупреждения для регионов с максимальной паводковой опасностью и играющих важную роль в водном хозяйстве страны.

Предлагаемые результаты позволяют повысить точность прогнозов стока рек России, существенно увеличить число водных объектов, для которых такие прогнозы могут составляться, сделать более своевременной и доступной для потребителей прогностическую информацию, необходимую для принятия водохозяйственных решений и защиты от опасных проявлений водного режима. Эти результаты предполагается использовать в оперативной деятельности прогностических учреждений Росгидромета.

Пользуясь случаем, авторы выражают благодарность сотрудникам ФГБУ «Гидрометцентр России» Н.К. Семеновой, Н.М. Юминой, В.В. Дерюгиной, В.М. Колий и Д.В. Блинову за помощь в подготовке используемых в монографии материалов.

Глава 1.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

1.1. Общие положения

Заблаговременность прогнозов

Возможности использования схемы получения прогнозов характеристик водного режима рек и водохранилищ определяются их точностью и заблаговременностью. Заблаговременность прогноза равна разности между сроком, к которому прогнозируемая характеристика может быть известна (часы, сутки, конец месяца, сезона, фазы гидрологического режима, квартала), и сроком составления прогноза.

Требуемая заблаговременность прогноза водного режима рек и водохранилищ определяется с учетом времени, необходимого для принятия мер по использованию водных ресурсов и защите от опасных проявлений водного режима. В небольших населенных пунктах достаточно нескольких часов для проведения эвакуации населения из района возможного затопления. Планирование работы комплексных водохозяйственных систем с многолетним и сезонным регулированием стока предусматривает долгосрочное прогнозирование его сезонных, квартальных и месячных величин [14, 91, 103, 124, 128].

Достижимая заблаговременность прогноза речного стока зависит от характера прогнозируемого явления; физико-географических особенностей водосбора; конфигурации сети гидрометеорологических наблюдений; заблаговременности, точности и формы представления метеорологических прогнозов [13, 48, 80, 124, 128, 136, 137].

Скорость и изменчивость процессов, протекающих после даты выпуска прогноза, являются лимитирующими факторами его заблаговременности. Для больших равнинных водосборов с медленным ходом определяющих прогнозируемую величину процессов и относительно небольшим влиянием погодных условий после даты составления прогноза достижимая заблаговременность прогноза может достигать иногда нескольких месяцев. Для малых горных рек с большими уклонами и скоростями склонового и руслового стока заблаговременность может снижаться до нескольких часов [11, 25–27, 47, 92].

В современной отечественной практике гидрологический прогноз относится к категории краткосрочных, если его заблаговременность не превышает 5–6 суток, среднесрочных – с заблаговременностью от 6–7 до 12–15 суток, долгосрочных – с заблаговременностью более 12–15 суток [13, 80].

Как правило, долгосрочные прогнозы выпускаются один раз в год, а краткосрочные прогнозы – ежедневно (в некоторых случаях каждые 6 или 12 часов) в течение некоторого периода (месяц, сезон, фаза гидрологического режима, квартал, год).

Для среднесрочных прогнозов возможны две ситуации.

1. Они выпускаются один раз в год и отличаются от долгосрочных прогнозов меньшей заблаговременностью.

2. Они выпускаются многократно, как правило, ежедневно в течение определенного периода времени, и отличаются от краткосрочных прогнозов большей заблаговременностью.

Прогнозируемые характеристики водного режима рек и водохранилищ

Долгосрочные и некоторые среднесрочные прогнозы речного стока могут составляться для следующих характеристик:

- сезонный, квартальный, месячный и декадный приток воды в водохранилища;
- сезонный, квартальный, месячный и декадный объем или слой речного стока;
- распределение стока реки или притока в водохранилище в течение сезона;
- максимальный расход и уровень воды половодья;
- объем, максимальный расход и уровень воды паводка;
- дата прохождения максимального расхода и уровня воды;
- дата начала основной волны половодья или паводка;
- средние и минимальные месячные и декадные уровни воды на судоходных реках;
- характерные уровни и расходы воды на реках во время весенних и осенних ледовых явлений на крупных реках [78, 80, 140].

В ряде случаев возможно последующее уточнение долгосрочных или среднесрочных прогнозов. Например, для характеристик половодья выпускается уточняющий прогноз после схода основной массы сезонного снежного покрова [63, 78, 80, 103]. Подобные уточнения используют дополнительную информацию, еще не известную при составлении основного прогноза. Следовательно, методику получения уточняющего прогноза следует рассматривать как самостоятельную методику, качество которой требует отдельной оценки.

Краткосрочные и некоторые среднесрочные прогнозы могут составляться для следующих характеристик водного режима рек в заданных створах и бокового притока воды в водохранилища:

- средний, максимальный и минимальный расход воды за сутки;
- средний, максимальный и минимальный уровень воды за сутки;
- график изменения расходов и уровней воды в течение определенного периода;
- объем, максимальный расход и уровень воды за паводок;
- объем, максимальный расход и уровень воды за половодье;
- дата начала, прохождения пика и конца половодья;
- объем, максимальный расход и уровень воды паводка;
- дата начала, прохождения пика и конца паводка для малых рек;
- минимальный расход и уровень воды в период летне-осенней межени;
- минимальный уровень и расход воды в период зимней межени;
- минимальный уровень и расход воды в период навигации;
- характерный уровень и расход воды во время весенних ледовых явлений;
- характерный уровень и расход воды во время осенних ледовых явлений [79, 80, 140].

Прогнозы могут выражаться в детерминированной и вероятностной форме. В первом случае с заданной заблаговременностью оценивается значение ожидаемой характеристики речного стока. Во втором случае оценивается распределение ее вероятностей в зависимости от располагаемой на дату составления прогноза гидрометеорологической информации [27]. Методика получения вероятностной формы выпуска прогноза строится на основе методики получения прогноза в детерминированной форме [13, 80, 99, 100, 123, 131, 133]. Как показано в работе [13], связанные между собой методики получения прогнозов в детерминированной и вероятностной форме за редким исключением имеют одинаковое качество, то есть заблаговременность и точность. На этом основании в последующем изложении рассматриваются прогнозы водного режима рек и водохранилищ, выражаемые в детерминированной форме.

Методы и методики прогнозирования речного стока

При решении задач гидрологических прогнозов следует различать два понятия: метод и методика прогнозирования.

Под методом понимается общий подход к решению задачи, вытекающий из физической сущности процессов, которые определяют прогнозируемое явление или элемент гидрологического режима. В основе методов прогнозирования характеристик речного стока лежат:

- уравнения водного баланса (для участка реки, части или всего речного бассейна) и теплового баланса (приземного слоя воздуха, снежного покрова, поверхности и почвенного слоя водосбора);

– уравнения, описывающие движение воды по склонам и в русловой сети;

– статистический анализ пространственно-временной изменчивости характеристик стока и метеорологических факторов, их определяющих [48, 78, 79, 91, 103, 107].

Методы прогнозирования речного стока могут реализовываться в виде:

– физико-математических моделей формирования речного стока с распределенными, то есть изменяющимися в пространстве параметрами [33, 61, 102, 140];

– концептуальных моделей с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [39, 53, 54, 94, 128, 132, 137];

– физико-статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза гидрологических и метеорологических факторов, влияющих на ее формирование [13, 78, 79].

Под методикой понимается способ получения прогнозов заданной характеристики водного режима для конкретного речного створа. Методика основана на одном из перечисленных выше методов и выражается схемой получения прогноза. Она отражает особенности водосбора и гидрологического режима реки, объем и качество гидрометеорологической информации, использованной при ее разработке и располагаемой при ее применении, включая прогнозы хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и способы их усвоения [33, 39, 48, 54, 102, 147].

Точность прогнозов речного стока

При заданной заблаговременности прогноза качество методики характеризует ее точность, которая определяется вероятными ошибками получаемых с ее помощью прогнозов. Эти ошибки всегда неизбежны, что вызвано рядом причин.

При большом числе действующих факторов не все из них учитываются схемой прогноза, так как характеристики некоторых из них не измеряются на сети пунктов гидрометеорологических наблюдений. Сами наблюдения всегда содержат погрешности, величина которых может быть весьма значительной и определяется техническими возможностями приборов и самих методик измерений [63, 80, 123]. Наконец, сам метод прогноза и методика его реализации лишь с той или иной степенью точности отражают природные закономерности формирования предсказываемого явления, особенно в условиях, когда метеорологические характеристики за период заблаговременности прогноза не известны или известны лишь приближенно.

Статистической оценкой, характеризующей величину вероятных ошибок прогнозов, является их погрешность. В настоящее время

факторы, определяющие погрешность прогнозов и ее структуру, достаточно хорошо изучены. Погрешность прогностической методики определяется:

- заблаговременностью прогноза;
- репрезентативностью, объемом и точностью исходных данных;
- распределением наблюдений в пространстве и во времени;
- ролью метеорологических элементов и точностью их прогнозирования;
- спецификой формирования и пространственно-временной изменчивости явления;
- адекватностью и полнотой описания прогнозируемого явления или процесса;
- репрезентативностью предикторов и влиянием неучтенных факторов;
- точностью определения параметров методики прогноза;
- техническими возможностями сбора необходимой информации;
- техническими возможностями составления прогноза и его доведения до пользователей [80, 86, 99, 143, 156].

Во многих случаях необходимость использования метеорологических прогнозов погодных условий на период заблаговременности гидрологического прогноза является его наиболее уязвимым местом [13, 80, 100, 137]. Чтобы разделить погрешности собственно гидрологических и метеорологических прогнозов, в ряде случаев при оценке погрешности прогнозов речного стока предлагается использовать фактически наблюдавшиеся в период заблаговременности метеорологические элементы, используемые при составлении конкретного прогноза – осадки, температуру и влажность воздуха, скорость ветра, а также другие элементы [13, 63, 80, 128, 140].

Определение и анализ погрешности методики гидрологического прогноза представляет очень важный этап ее разработки и последующего оперативного использования. Это обусловлено не только тем, что при заданной заблаговременности погрешность прогноза является важнейшим показателем его практической ценности. Анализ погрешности методики прогноза позволяет выявить ее слабые стороны и наметить пути ее совершенствования. Результаты такого анализа, выполненные для совокупности методик прогноза различных гидрологических характеристик в пределах целого региона, могут определить и обосновать направления по совершенствованию сети гидрологических и метеорологических наблюдений и системы сбора и обработки гидрометеорологической информации [13, 86, 137].

Правила анализа погрешности прогнозирования речного стока излагаются в следующем разделе.

1.2. Погрешность прогнозов речного стока

Определение погрешности прогнозов

В 1992 году Международным институтом прогнозистов (International Institute of Forecasters) был проведен опрос о критериях качества методик прогноза, используемых в различных областях науки и практики [164]. Были опрошены сотни потребителей прогнозов – ученых, преподавателей, практиков, менеджеров и чиновников. Наиболее важными показателями качества прогнозов были указаны:

- точность прогноза – 90 %;
- его заблаговременность – 84 %;
- дешевизна получения прогноза – 82 %;
- простота составления прогноза – 77 %;
- его научная обоснованность – 63 %.

Последняя цифра не должна вводить в заблуждение, так как за редким исключением точность прогнозов является наилучшим свидетельством их научной обоснованности.

При определении погрешности методики прогнозирования речного стока исходят из того, что в процессе ее последующего применения соотношение между прогнозом характеристики речного стока \tilde{Y} и ее фактическим значением Y сохраняется приблизительно таким же, каким оно было в период гидрометеорологических наблюдений, использованных при построении данной методики. В подавляющем большинстве случаев в отечественной и мировой практике гидрологических прогнозов их погрешность характеризуется математическим ожиданием квадрата ошибки прогноза:

$$S^2 = M[(Y - \tilde{Y})^2]. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) полностью соответствует принятому подходу к определению погрешности различных статистических оценок [17, 152, 157]. Отказ от такого показателя сопряжен со значительными трудностями математического характера вплоть до необходимости перестройки аппарата математической статистики. Кроме того, как показано в работе [13], негативный эффект, возникающий при принятии различных водохозяйственных решений вследствие ошибок используемых прогнозов речного стока, приблизительно пропорционален величине S^2 .

В то же время обоснование наиболее подходящего показателя погрешности конкретной методики прогноза должно учитывать не только возможности получения оценки такого показателя, но и интересы потребителей данного прогноза. В работе [13] приведены примеры более подходящих показателей погрешности прогноза при принятии водохозяйственных решений в условиях прохождения экстремально высоких

пиков половодий или паводков или в условиях экстремально низкой межени. Однако использование иных показателей погрешности прогнозов речного стока оправдано только при разработке методики прогнозирования под конкретного потребителя, поэтому в последующем изложении используется среднеквадратическая погрешность прогноза S , определяемая формулой (1.1).

Для долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока, выпускаемых один раз в год, формула (1.1) определяет погрешность ежегодного прогноза.

Для краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток (месяц, сезон, фаза водного режима, квартал, год), ежедневные прогнозы $\tilde{Y}(t)$ сравниваются с фактическими значениями прогнозируемой величины $Y(t)$ при $t = 1, \dots, T$ и используется их средняя погрешность за этот период:

$$S^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M \{ [Y(t) - \tilde{Y}(t)]^2 \}. \quad (1.2)$$

Фактическое значение Y содержит ошибку измерения или расчета фактического значения прогнозируемой характеристики речного стока. Сведения о возможных размерах такой ошибки содержатся в работах [59, 67, 80, 123]. В ряде случаев ее вероятные значения могут быть весьма большими. Такая ситуация характерна для определения расходов воды на широких реках с сильно заросшей поймой или на горных реках с интенсивными русловыми процессами и изменяющимися кривыми расходов. Погрешность определения фактического значения прогнозируемой величины является нижним пределом возможного значения погрешности прогноза. Если погрешность методики прогнозирования близка к погрешности определения фактических значений прогнозируемой величины, то это свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего усовершенствования такой методики [13].

Оценка погрешности прогнозов

Погрешность методики прогнозирования речного стока оценивается на основе статистического анализа ряда ошибок проверочных прогнозов $Y_1 - \tilde{Y}_1, \dots, Y_N - \tilde{Y}_N$. Для выпускаемых раз в год долгосрочных и среднесрочных прогнозов длина этого ряда n равна числу лет n , для которых определялись ошибки прогнозирования, то есть $N = n$. Для краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток, длина ряда N ошибок проверочных прогнозов в T раз больше числа таких лет, то есть $N = nT$.

При оценке среднеквадратической погрешности прогноза S или ее квадрата S^2 следует различать проверку методики на зависимом и независимом материале.

При проверке на репрезентативном независимом материале, который образован гидрометеорологической информацией, не использованной при разработке методики и оценке содержащихся в ней параметров, стандартная статистическая оценка величины S^2 является несмещенной, то есть не дает систематического занижения или завышения.

Такая ситуация возможна при наличии достаточного числа проверочных прогнозов, полученных уже после того, как проверяемая методика была разработана. В этом простейшем случае среднее значение квадрата ошибки прогноза оценивается по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (1.3)$$

При проверке на зависимом материале, который образован гидрометеорологической информацией, использованной при разработке методики и оценке содержащихся в ней параметров, стандартная статистическая оценка величины S^2 приводит к ее систематическому занижению. Причем это занижение может быть весьма значительным, если число оцениваемых параметров схемы получения прогноза велико по сравнению с длиной рядов гидрологических и метеорологических наблюдений [13, 17, 99, 134, 144, 156].

Подробное изложение методов оценки погрешности прогнозов и анализ надежности этих методов в различных ситуациях содержатся в работах [13, 17]. В последующем изложении рассматривается применение четырех из них.

Для оценки погрешности выпускаемых один раз год долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока целесообразно применение двух методов.

Метод 1

Данный метод является наиболее простым и позволяет оценивать среднеквадратическую погрешность прогноза на зависимом материале по ряду ошибок проверочных прогнозов $Y_1 - \tilde{Y}_1, \dots, Y_n - \tilde{Y}_n$ за n лет, использованных при разработке проверяемой методики. Метод учитывает соотношение между длиной ряда проверочных прогнозов n и числом k оцениваемых параметров формулы получения прогноза. Оценка среднеквадратической погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{(n-1)}{(n-k)(n-k-1)} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (1.4)$$

Формула (1.4) дает несмещенную оценку величины $M[(Y - \tilde{Y})^2]$ при условии, что формула получения прогноза имеет полиномиальный вид, то есть линейно зависит от оцениваемых параметров. Однако практика применения данного метода показывает, что он дает вполне удовлетворительные результаты практически для любых схем получения долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока [13].

Метод 2

Данный метод «выбрасываемой точки» (Jackknife Method Дж. В. Тьюки) является универсальным, однако более трудоемким [13, 17, 86, 134, 154]. Последовательно исключается каждый год с номером i и по оставшимся наблюдениям за $n - 1$ год строится вариант схемы получения прогноза, у которого частично меняются используемые параметры или графики. Полученный для года с номером i прогноз $\tilde{Y}_{(i)}$ сравнивается с фактическим значением Y_i прогнозируемой гидрологической характеристики. Данная процедура выполняется поочередно для всех $i = 1, \dots, n$ лет с возвращением в обучающий ряд данных года, исключенного на предыдущем этапе. В результате образуется ряд ошибок проверочных прогнозов на независимом материале $Y_i - \tilde{Y}_{(i)}$ при $i = 1, \dots, n$. Полученная методом «выбрасываемой точки» оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_{(i)})^2. \quad (1.5)$$

Пример 1

Методика долгосрочного прогнозирования среднего за апрель расхода притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС с заблаговременностью $\Delta t = 35$ суток разработана в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» при участии Д.А. Буракова [13]. Она основана на линейной статистической зависимости, которая содержит $k = 3$ параметра, определенных по данным многолетних наблюдений за $n = 25$ лет. Метод 1 дал оценку среднеквадратической погрешности прогноза $S = 162 \text{ м}^3/\text{с}$. Метод 2 дал оценку среднеквадратической погрешности прогноза $S = 164 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, оба метода дали практически одинаковые результаты.

Для оценки определяемой формулой (1.2) погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток, целесообразно применение двух методов, рассмотренных ниже.

Метод 3

Данный метод (Cross-Validation Method) является наиболее простым и часто используемым [13, 17, 101, 134]. Данные за лет n гидрометеорологических наблюдений разбиваются на обучающий ряд продолжительностью n_o лет и контролирующий ряд продолжительностью $n_k = n - n_o$ лет. Обучающий ряд используется для разработки методики прогнозирования, а контролирующий ряд – для ее проверки. Согласно Методическим указаниям [72] длина обучающего ряда должна составлять не менее 20 % длины обучающего ряда. При этом необязательно выделять первые n_o лет наблюдений для формирования обучающего ряда, а последние n_k лет для формирования контролирующего ряда. Если сменить нумерацию лет таким образом, чтобы входящие в контролирующий ряд годы имели номера $i = 1, \dots, n_k$, то полученная методом 3 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{n_k T} \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_i(t)]^2 \quad (1.6)$$

Метод 4

Данный метод является более трудоемким, однако дает более точные результаты. По существу он является вариантом метода 2 «выбрасываемой точки», предназначенным для оценки погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, ежедневно выпускаемых в течение периода продолжительностью T суток. Последовательно исключается каждый год с номером i и по оставшимся наблюдениям за $n-1$ год строится вариант схемы получения прогноза. Полученные для года с номером i прогнозы $\tilde{Y}_{(i)}(t)$ сравниваются с фактическими значениями $Y_i(t)$ прогнозируемой гидрологической характеристики при $t = 1, \dots, T$. Данная процедура выполняется поочередно для всех лет $i = 1, \dots, n$ с возвращением в обучающий ряд данных года, исключенного на предыдущем этапе. В результате образуется ряд ошибок проверочных прогнозов $Y_i - \tilde{Y}_{(i)}$ при $i = 1, \dots, n$ [13]. Полученная методом 4 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_{(i)}(t)]^2. \quad (1.7)$$

Пример 2

Методика краткосрочного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки разработана

в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». Она основана на концептуальной модели формирования талого и дождевого стока и предназначена для ежедневного выпуска прогнозов в течение каждого месяца и всего года в целом [14]. Для оценки параметров модели и проверки методики использованы данные гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1994 по 2011 год продолжительностью $n = 18$ лет. При оценке погрешности методики методом 3 в качестве обучающего ряда использованы последние три года. В табл. 1.1 для каждого месяца и всего года в целом помещены оценки среднеквадратической погрешности S м³/с прогноза расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи, полученные методами 3 и 4.

Таблица 1.1

**Оценки погрешности прогнозов среднесуточных расходов
воды в створе р. Сочи – г. Сочи**

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Метод 3	11,4	8,2	11,1	8,8	17,2	12,5	9,7	10,4	9,8	14,5	16,1	15,7	12,1
Метод 4	10,4	8,5	10,7	8,6	14,8	12,1	9,2	11,2	8,8	15,3	14,5	16,2	12,0

Приведенные данные показывают, что оба метода дали практически одинаковые результаты.

Влияние ошибок метеорологических прогнозов

При выпуске краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока требуется учет метеорологических элементов в течение периода их заблаговременности. Это достигается путем использования метеорологических прогнозов. С увеличением заблаговременности погрешность таких прогнозов возрастает и может оказаться весьма значительной [62, 147]. В результате погрешность прогноза может оказаться намного больше погрешности расчета, которая получается при использовании фактически наблюдавшихся метеорологических элементов и характеризует качество собственно гидрологического блока методики прогнозирования [61, 124, 137]. Подобные изменения будут тем значительнее, чем больше погрешность прогноза метеорологических элементов и выше их влияние на результаты прогнозирования [13]. Данная проблема подробно рассматривается в главах 3 и 4. В настоящем разделе можно ограничиться одним примером.

Пример 3

В уже упомянутой методике прогнозов стока для рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки соответствующие этим суткам слой осадков и среднесуточная температура

приземного слоя воздуха оценивались с помощью оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-Ru. В связи с ошибками метеорологических прогнозов погрешность гидрологического прогнозирования возросла на 10–20 % по сравнению с расчетом по фактическим данным об осадках и температуре за предстоящие сутки. В частности, для реки Мзымта у п. Красная Поляна средняя для всего года погрешность расчета, равная 8,6 м³/с, возросла до погрешности прогноза, равной 9,9 м³/с.

После того, как методика прогнозирования получена, возможна дополнительная коррекция выпускаемых с ее помощью прогнозов с целью устранения отдельных недостатков. Эти недостатки могут быть обусловлены неполной адекватностью модели или статистической зависимости, влиянием неучтенных факторов формирования речного стока и его изменчивости во времени, недостаточными объемом, точностью и репрезентативностью данных наблюдений и ошибками предсказания хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза.

Практика свидетельствует, что дополнительная коррекция может оказаться весьма эффективной [137]. Она не требует значительных затрат времени и средств и при этом может приводить к существенному повышению точности гидрологических прогнозов. В связи с этим в следующем разделе рассматриваются некоторые хорошо зарекомендовавшие себя и предлагаемые к использованию в оперативной практике методы коррекции прогнозов речного стока и притока воды в водохранилища [21].

1.3. Методы коррекции прогнозов речного стока

Коррекция прогнозов методом линейной регрессии

Если проверка методики по обучающей выборке показала, что среднее значение ошибки прогноза $Y - \tilde{Y}$ статистически достоверно отличается от нуля на величину систематической ошибки $\bar{\delta}$, то простейший вариант коррекции состоит в ее устранении путем увеличения прогнозов на эту величину. В данном случае коррекция состоит в переходе от значений \tilde{Y} к значениям $\tilde{Y}_c = \tilde{Y} + \bar{\delta}$.

В качестве более эффективного средства рекомендуется метод линейной регрессии, в котором учитываются стандартные статистические оценки математического ожидания $m(Y)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma(Y)$ прогнозируемой величины Y , аналогичные оценки

$m(\tilde{Y})$ и $\sigma(\tilde{Y})$ для ее прогноза \tilde{Y} и оценка коэффициента корреляции R между величинами Y и \tilde{Y} . Скорректированный прогноз определяется в виде:

$$\tilde{Y}_C = m(Y) + R \frac{\sigma(Y)}{\sigma(\tilde{Y})} [\tilde{Y} - m(\tilde{Y})]. \quad (1.8)$$

Данное выражение представляет известную в математической статистике формулу линейной регрессии [17].

Скорректированный по формуле (1.8) прогноз \tilde{Y}_C имеет такое же среднее значение $m(Y)$, что и прогнозируемая величина. Следовательно, данный метод коррекции позволяет устранить возможную систематическую ошибку прогноза.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(\tilde{Y}_C)$ скорректированного прогноза равно $R\sigma(Y)$, то есть оно всегда несколько меньше, чем у прогнозируемой величины. Следовательно, амплитуда вероятных колебаний скорректированного прогноза \tilde{Y}_C меньше, чем у прогнозируемой величины Y . Ее предсказуемость с помощью корректируемой методики характеризуется коэффициентом R . С ростом предсказуемости рассматриваемой гидрологической характеристики этот коэффициент приближается к единице. При этом среднеквадратическое отклонение $R\sigma(Y)$ скорректированного прогноза и амплитуда его вероятных колебаний будут приближаться к среднеквадратическому отклонению $\sigma(Y)$ и амплитуде вероятных колебаний прогнозируемой величины [21]. Таким образом, реализуется выдвинутая лауреатом Нобелевской премии Д. Канеманом идея о том, что чем выше предсказуемость, тем шире должен быть диапазон прогнозов, а в идеальном случае он должен совпасть с диапазоном прогнозируемой величины [131].

Использование предлагаемого варианта коррекции прогнозов позволяет снизить их погрешность. Рассчитанная по аналогии с величиной S среднеквадратическая погрешность S_C скорректированного прогноза \tilde{Y}_C может выражаться формулой:

$$S_C = \sigma(Y)\sqrt{1-R^2}. \quad (1.9)$$

Формула (1.9) показывает, что предлагаемый вариант коррекции всегда снижает погрешность методики прогнозирования, и этот эффект усиливается по мере роста коэффициента корреляции R между прогнозируемой величиной Y и ее прогнозом \tilde{Y} [21].

Пример 4

В отделе речных гидрологических прогнозов ФБГУ «Гидрометцентр России» разработана методика прогнозирования ежедневных расходов воды для рек бассейна Оки в течение всего года с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток. Методика основана на разработанной в Республике Корея концептуальной модели формирования речного стока DWAT (Dynamic Water Resources Assessment Tool) [132]. Оптимизация параметров модели выполнена по данным гидрометеорологических наблюдений за период с 2010 по 2015 год, за исключением данных 2013 года, которые использованы для проверки методики на независимом материале. Результаты применения коррекции прогнозов по формуле (1.8) помещены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Коррекция прогнозов расхода воды для рек бассейна Оки

Река	Пост	R	S , м ³ /с	S_C , м ³ /с
Упа	с. Орлово	0,84	69,2	51,2
Жиздра	г. Козельск	0,80	74,2	58,5
Угра	с. Товарково	0,83	232	188
Ока	г. Калуга	0,93	316	205

Приведенные данные показывают, что коррекция методом линейной регрессии позволяет снизить погрешность прогноза на 19–35 %. Столь значительное уточнение методики прогнозирования обусловлено прежде всего устранением значительных систематических ошибок, допущавшихся при прогнозировании расходов воды с помощью модели *DWAT*.

Коррекция долгосрочных прогнозов методом их частичного осреднения

В отечественной практике долгосрочного гидрологического прогнозирования применяется правило: если среднеквадратическая погрешность проверяемой методики S превышает стандартное отклонение прогнозируемой величины $\sigma(Y)$, то используется климатический прогноз. В этом случае прогноз гидрологической характеристики Y определяется только ее нормой – оценкой математического ожидания $m(Y)$, рассчитанной по ряду всех ее наблюдавшихся значений, входящих в обучающую выборку [5, 6].

Предлагаемый вариант коррекции прогнозов отчасти использует данное правило. Отличие состоит в том, что при определенных условиях рекомендуется использовать среднее значение прогнозируемой

величины Y только в пределах некоторого промежутка значений прогноза \tilde{Y} [21, 86]. Как и любой другой метод коррекции, он основан на статистическом анализе ряда $(Y_1, \tilde{Y}_1), \dots, (Y_n, \tilde{Y}_n)$ значений прогнозируемой величины и ее прогнозов, полученных на независимом материале. Весь диапазон возможных значений прогноза разбивается на k промежутков (полуинтервалов) I_1, \dots, I_k таким образом, чтобы число n_i членов ряда $\tilde{Y}_1, \dots, \tilde{Y}_n$, попавших в промежуток с номером i было бы не менее 8–10 [17, 21]. Для каждого промежутка должны быть получены среднее арифметическое $m_i(Y)$ и оценка стандартного отклонения $\sigma_i(Y)$ фактических значений прогнозируемой величины, прогнозы которых попали в данный промежуток. Для каждого промежутка должна быть рассчитана среднеквадратическая погрешность прогноза S_i . Для общей погрешности прогноза S и величин S_1, \dots, S_k справедливо соотношение:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i S_i^2. \quad (1.10)$$

Предлагаемый вариант коррекции прогнозов методом их частичного осреднения основан на следующем правиле.

1. Скорректированный прогноз \tilde{Y}_C принимается равным прогнозу \tilde{Y} , если последний попадает в промежуток I_i и при этом среднеквадратическая погрешность прогноза S_i не превышает погрешность климатического прогноза $\sigma_i(Y)\sqrt{n_i+1}/\sqrt{n_i}$ для данного промежутка.

2. Скорректированный прогноз \tilde{Y}_C принимается равным среднему арифметическому $m_i(Y)$, если прогноз \tilde{Y} попадает в промежуток I_i и при этом среднеквадратическая погрешность прогноза S_i превышает погрешность климатического прогноза $\sigma_i(Y)\sqrt{n_i+1}/\sqrt{n_i}$ для данного промежутка.

Данное правило может быть выражено следующей формулой:

$$\tilde{Y}_C = \begin{cases} \tilde{Y}, & \text{если } \tilde{Y} \in I_i \text{ и } S_i \leq \sigma_i(Y)\sqrt{n_i+1}/\sqrt{n_i}, \\ m_i(Y), & \text{если } \tilde{Y} \in I_i \text{ и } S_i > \sigma_i(Y)\sqrt{n_i+1}/\sqrt{n_i}. \end{cases} \quad (1.11)$$

В первой ситуации при попадании \tilde{Y} в промежуток I_i погрешность скорректированного прогноза равна S_i .

Во второй ситуации при попадании \tilde{Y} в промежуток I_i погрешность скорректированного прогноза равна $\sigma_i(Y)\sqrt{n_i+1}/\sqrt{n_i}$ и будет меньше величины S_i .

Из формулы (1.11) следует, что погрешность S_C скорректированного прогноза не превышает погрешность S рассматриваемой методики. Причем равенство $S_C = S$ достигается в ситуации, когда скорректированный прогноз совпадает с первоначальным.

Как правило, переход от прогноза, получаемого по рассматриваемой методике, к \tilde{Y} осредненному значению $m_i(Y)$ происходит на крайних промежутках I_1 и I_k или на одном из них. При этом диапазон значений скорректированных прогнозов становится меньше, чем у прогнозов по уточняемой методике. Таким образом, предлагаемый метод коррекции также реализует идею о целесообразности сокращения амплитуды прогнозных значений в условиях их неполной достоверности [21, 86].

Процедуру коррекции прогнозов путем их частичного осреднения облегчает анализ коррелограммы, представляющей зависимость между фактическими значениями Y_j и их прогнозами \tilde{Y}_j при $j = 1, \dots, n$ (см. рис 1.1).

Пример 5

В отделе речных гидрологических прогнозов ФБГУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования объема притока воды в Камское водохранилище за второй квартал. Она основана на линейной зависимости этого объема от осредненных по водосбору водохранилища максимальных запасов воды в снежном покрове. Методика получена на основе данных наблюдений за период с 1990 по 2018 год.

Для методик, основанных на линейных статистических зависимостях прогнозируемой величины от используемых предикторов или каких-либо функций от этих предикторов, коррекция методом линейной регрессии теряет необходимость, так как скорректированные таким образом прогнозы совпадают с исходными. На рис. 1.1 представлена коррелограмма зависимости между фактическими значениями объемов притока и их прогнозами.

Среднеквадратическая погрешность прогноза S равна $4,26 \text{ км}^3$.

Перебор различных вариантов привел к выводу о целесообразности разбиения диапазона значений прогноза на два промежутка ($k = 2$) с выделением прогнозов, которые не превышают 38 км^3 , и прогнозов,

которые превышают это значение. Количество прогнозов, попадающих в эти промежутки, составляет $n_1 = 18$ и $n_2 = 11$.

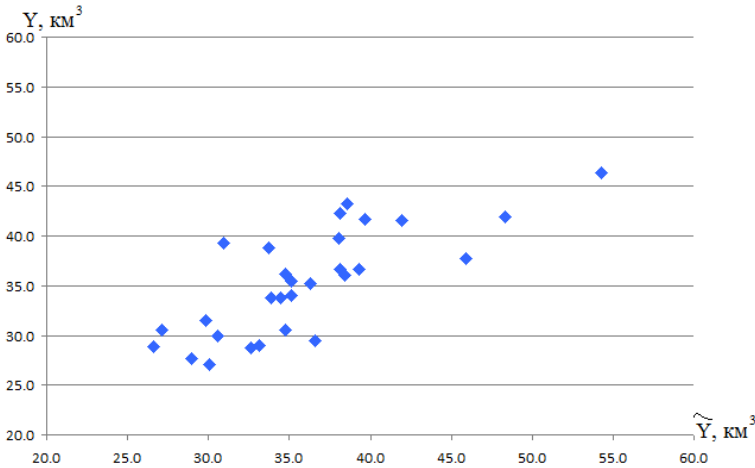


Рис. 1.1. Коррелограмма зависимости между фактическими значениями объемов притока воды в Камское водохранилище за второй квартал и их прогнозами.

Среднеквадратическая погрешность прогнозов в первом промежутке S_1 равна $3,84 \text{ км}^3$. Она оказалась меньше величины $\sigma_1(Y)\sqrt{n_1 + 1}/\sqrt{n_1} = 4,10 \text{ км}^3$, поэтому в первом промежутке коррекция прогнозов нецелесообразна.

Среднеквадратическая погрешность прогнозов во втором промежутке S_2 равна $4,42 \text{ км}^3$. Она оказалась больше величины $\sigma_2(Y)\sqrt{n_2 + 1}/\sqrt{n_2} = 3,42 \text{ км}^3$, поэтому во втором промежутке прогноз следует заменять величиной $m_2(Y) = 40,3 \text{ км}^3$.

Правило коррекции в данном случае описывается формулой:

$$\tilde{Y}_C = \begin{cases} \tilde{Y}, & \text{если } \tilde{Y} \leq 38, \\ 40,3, & \text{если } \tilde{Y} > 38. \end{cases} \quad (1.12)$$

Среднеквадратическая погрешность скорректированного таким образом прогноза оказалась равной $S_C = 3,68 \text{ км}^3$. Таким образом, коррекция прогнозов объема притока воды в Камское водохранилище за второй квартал методом их частичного осреднения позволила снизить погрешность прогнозирования на 13,6 %. Предложенный в работе [13] критерий показал статистическую достоверность такого снижения погрешности прогнозов за счет их коррекции.

Коррекция прогнозов методом учета автокорреляции их ошибок

Данный метод широко применяется в отечественной и мировой практике в целях коррекции краткосрочных прогнозов речного стока, которые выпускаются ежедневно на протяжении всего года или определенной фазы водного режима [14, 21, 79, 121]. Идея метода состоит в том, что если к дате $t - \Delta t$ составления прогноза известные результаты прогнозирования демонстрируют завышение или, наоборот, занижение фактических значений, то составляемый прогноз целесообразно уменьшить или соответственно увеличить. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих дате $t - \Delta t$ прогнозов образуют серию отрицательных или положительных значений. Применимость данного подхода обусловлена тем, что если краткосрочные прогнозы характеристики речного стока составляются по одной методике для близких сроков, то для их ошибок, как правило, характерна высокая корреляция [21, 79, 137].

В основе рассматриваемого метода коррекции лежит предположение о том, что в течение достаточно продолжительного периода (месяца, фазы водного режима или всего года) последовательность ошибок $\delta = Y - \tilde{Y}$ ежедневных прогнозов по рассматриваемой методике описывается моделью стационарного процесса авторегрессии порядка l с нулевым математическим ожиданием. Для обеспечения последнего свойства систематическая ошибка прогнозов должна быть предварительно устранена описанным выше способом.

Такой процесс полностью описывается автокорреляционной функцией $r(\tau)$, которая задает коэффициент корреляции между ошибками прогноза $\delta(t)$ и $\delta(t - \tau)$ для всех целых значений τ . В рамках данной модели ошибка прогноза $\delta(t) = Y(t) - \tilde{Y}(t)$ может предсказываться по формуле:

$$\tilde{\delta}(t) = \sum_{i=1}^l a_i \delta(t - \Delta t - i + \lambda) . \quad (1.13)$$

Параметр λ равен 1, если при составлении прогноза для даты t уже известна ошибка прогноза $\delta(t - \Delta t)$. Параметр λ равен 0 в противном случае, когда известна только ошибка $\delta(t - \Delta t - 1)$ [89]. Остальные параметры формулы (1.13) определяются системой уравнений Юла – Уолкера при заданной автокорреляционной функции $r(\tau)$, которая подлежит статистической оценке по ряду проверочных прогнозов. Точность прогноза ошибки $\delta(t)$ определяется множественным коэффициентом корреляции R_l между этой величиной и входящими в формулу

(1.13) известными к дате $t - \Delta t$ ошибками прогноза $\delta(t - \Delta t - 1 + \lambda), \dots, \delta(t - \Delta t - l + \lambda)$ [87]. Знак величины $\tilde{\delta}(t)$ определяется преобладанием положительных или отрицательных значений среди этих ошибок. Следовательно, эта величина будет положительной, если близкие к дате $t - \Delta t$ прогнозы были в основном заниженными, и отрицательной, если они были в основном завышенными.

Скорректированный прогноз на дату t определяется формулой:

$$\tilde{Y}_C(t) = \tilde{Y}(t) + \tilde{\delta}(t). \quad (1.14)$$

Среднеквадратическая погрешность скорректированного прогноза равна:

$$S_C = S\sqrt{1 - R_l^2}. \quad (1.15)$$

Формула (1.15) показывает, что чем выше корреляция между ошибками прогноза для близких сроков, тем эффективнее данный метод коррекции. С ростом порядка модели авторегрессии l коэффициент R_l возрастает, однако при этом увеличивается и число подлежащих оценке параметров модели. Оптимальный порядок модели определяется с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только коэффициент R_l , но и соотношение между числом l оцениваемых параметров модели и длиной ряда, по которому оценивается автокорреляционная функция $r(\tau)$ [21, 87].

Пример 6

В целях прогнозирования ежедневных расходов воды реки Коса (правый приток Камы) у с. Коса в течение всего года с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки использована концептуальная модель формирования стока HBV-96, разработанная в Институте метеорологии и гидрологии Швеции [94, 95]. Получаемые с помощью модели прогнозы предварительно корректировались описанным выше методом линейной регрессии в целях устранения систематической ошибки и уменьшения диапазона их значений. Для калибровки модели и оценки параметров формулы (1.8) использованы данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2008 по 2016 год. Данные за 2017 год использованы для проверки методики на независимом материале. Среднеквадратическая погрешность прогноза равна $S = 33,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

При составлении прогноза для даты t результат прогноза на дату $t - 1$ был уже известен, поэтому параметр λ в формуле (1.13) принят равным единице. На основе результата применения критерия Акаике для описания последовательности ошибок ежедневных прогнозов

использована модель стационарного процесса авторегрессии первого порядка. Для такой модели единственный параметр a_1 в формуле (1.13) равен коэффициенту корреляции $r(1)$ между ошибками прогноза для соседних суток, который совпадает с коэффициентом R_1 в формуле (1.15). В рассматриваемом случае этот коэффициент равен $r(1) = 0,973$.

С учетом формул (1.13) и (1.14) при $\lambda = 1$, $l = 1$ и $\Delta t = 1$ коррекция прогнозов выполнялась следующим образом:

$$\tilde{Y}_C(t) = \tilde{Y}(t) + r(1)[Y(t-1) - \tilde{Y}(t-1)]. \quad (1.16)$$

Рассчитанная по формуле (1.15) среднеквадратическая погрешность скорректированных прогнозов равна $S_C = 7,73 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, за счет высокой корреляции между ошибками ежедневного прогноза расходов воды реки Коса с заблаговременностью одни сутки коррекция на основе учета автокорреляции этих ошибок позволила снизить погрешность методики в 4,3 раза.

Приведенные примеры использования рассмотренных вариантов коррекции для повышения точности краткосрочного и долгосрочного прогнозирования речного стока по различным методикам демонстрируют их достаточно высокую эффективность.

1.4. Эффективность прогнозов речного стока

Альтернативные методы прогноза

В отечественной практике прогнозов речного стока эффективность методики прогнозирования оценивается путем сравнения ее погрешности с погрешностью альтернативного прогноза, который основан только на статистическом анализе многолетних данных о самой прогнозируемой характеристике [63, 72].

Для выпускаемых один раз в год долгосрочных прогнозов в качестве такой безусловной альтернативы рассматривается климатический прогноз. Климатический прогноз характеристики речного стока Y выражается ее нормой \bar{Y} , рассчитанной по ряду Y_1, \dots, Y_n данных многолетних наблюдений за n лет. Погрешность такого прогноза принято характеризовать оценкой дисперсии величины Y по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2. \quad (1.17)$$

Для краткосрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение некоторого периода (месяц, сезон, фаза водного режима, квартал, год),

в качестве безусловной альтернативы рассматривается инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{Y}_t(t)$ для суток t использует известное на дату его составления значение $Y(t - \Delta t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{Y}_t(t) = Y(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (1.18)$$

где $\bar{\Delta}$ вычисляется, как среднее арифметическое ряда $\Delta_1, \dots, \Delta_N$, образованного $N = nT$ наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики $Y(t) - Y(t - \Delta t)$ за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (1.19)$$

Для среднесрочных прогнозов речного стока выбор между климатическим и инерционным прогнозом определяется соотношением между показателями σ и σ_{Δ} их погрешности: при условии $\sigma > \sigma_{\Delta}$ в качестве альтернативы используется инерционный прогноз; при условии $\sigma < \sigma_{\Delta}$ в качестве альтернативы используется климатический прогноз [13].

Согласно части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 года [63], эффективность методики прогнозирования характеризуется отношением S/σ_A , в котором погрешность альтернативного прогноза σ_A равна σ или σ_{Δ} , – чем ниже отношение S/σ_A , тем выше эффективность прогнозов. В зависимости от этого показателя и числа проверочных прогнозов n методика прогнозирования по своей эффективности относится к одной из трех возможных категорий качества в соответствии с табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Показатели качества методики прогнозирования
речного стока**

Категория оценки	$N \leq 15$	$15 < N < 25$	$N \geq 25$
Хорошая	$S/\sigma_A \leq 0,40$	$S/\sigma_A \leq 0,45$	$S/\sigma_A \leq 0,50$
Удовлетворительная	$0,40 < S/\sigma_A \leq 0,70$	$0,45 < S/\sigma_A \leq 0,75$	$0,50 < S/\sigma_A \leq 0,80$
Неудовлетворительная	$S/\sigma_A > 0,70$	$S/\sigma_A > 0,75$	$S/\sigma_A > 0,80$

В дополнение к отношению S/σ_A в отечественной практике учитывается оправдываемость прогнозов P , которая равна частоте случаев, когда ошибка прогнозов не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$. В целом, по мере снижения отношения S/σ_A оправдываемость прогнозов P возрастает. В частности, при нормальном распределении ошибок прогноза по проверяемой методике соотношение между этими величинами определяется табл. 1.4.

Таблица 1.4

Вероятность допустимых ошибок P при различных значениях S/σ_A

S/σ_A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
P %	100	99,9	97,5	91	82,5	74	66,5	60	54,5	50

Пример 7

Для рассмотренной в примере 1 методики долгосрочного прогнозирования среднего за апрель расхода притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС отношение S/σ_A равно 0,61, а оправдываемость прогнозов P равна 84 %. Следовательно, данная методика может быть отнесена к категории удовлетворительных [13].

Пример 8

Для рассмотренной в примере 2 методики краткосрочного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа качество прогнозов оказалось удовлетворительным для всех анализируемых речных створов [14]. В табл. 1.5 для створа р. Сочи – г. Сочи приведены значения показателя эффективности прогнозов S/σ_A и их оправдываемости P .

Таблица 1.5

Показатели качества прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
S/σ_A	0,58	0,62	0,55	0,63	0,56	0,75	0,72	0,74	0,64	0,64	0,57	0,64	0,65
P , %	79	81	79	84	76	79	85	76	75	73	76	74	78

Удовлетворительное качество прогнозов расходов воды в данном створе демонстрирует рис. 1.2.

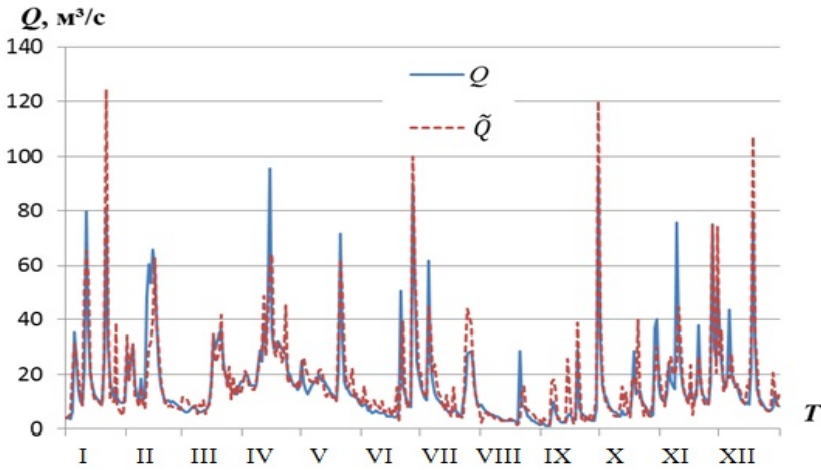


Рис. 1.2. Фактический $Q(t)$ и спрогнозированный $\tilde{Q}(t)$ графики колебаний среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи в 2001 г.

Усовершенствованная оценка эффективности методик прогнозирования

Изложенные правила, сформулированные в части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 года [63], весьма приближенно решают вопрос о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$, то есть преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом. В Наставлении недостаточно детально учитывается число n проверочных прогнозов и, главное, не учитывается корреляция между ошибками прогноза по проверяемой методике и ошибками альтернативного прогноза. Чем больше эта корреляция, тем выше статистическая достоверность преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом при том же значении показателя S/σ_A и длине n ряда проверочных прогнозов.

В целях преодоления указанных недостатков, в работах [13, 22] предложен критерий проверки статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ с учетом продолжительности ряда проверочных прогнозов N и оценки коэффициента корреляции r между синхронными ошибками прогнозов по проверяемой методике и ошибками альтернативного прогноза. Согласно данному критерию, статистическая достоверность вывода о целесообразности практического применения проверяемой методики возрастает по мере увеличения величин N и r .

На основе данного критерия может быть предложен следующий показатель эффективности методики долгосрочного прогнозирования, для которой $N = n$:

$$K = 0,15n \ln \left[1 + \frac{(\sigma^2 - S^2)^2}{4\sigma^2 S^2 (1-r^2)} \right]. \quad (1.20)$$

При достаточно большом числе проверочных прогнозов n величина $K/0,15$ приблизительно подчиняется распределению хи-квадрат с одной степенью свободы [13, 22]. При условии $K = 1$ вероятность ошибочного вывода о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ приблизительно равна 1 %. При условии $K = 0,4$ вероятность ошибочного вывода о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$ приблизительно равна 10 %. На этом основании эффективность методики прогнозирования следует считать хорошей при условии $K \geq 1$, удовлетворительной при условии $0,4 \leq K < 1$ и неудовлетворительной при условии $K < 0,4$.

Определяемый формулой (1.20) показатель следует использовать при отсутствии статистически достоверной автокорреляции в рядах ошибок сравниваемых прогнозов. Данная ситуация характерна при долгосрочном прогнозировании характеристик речного стока. Для рядов ошибок краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды, ежедневно выпускаемых в течение всего года или достаточно продолжительной фазы водного режима, такая автокорреляция может быть весьма значительной [13]. Во избежание чрезмерного усложнения расчетов в этом случае достаточно учитывать коэффициенты корреляции $r_M(1)$ и $r_A(1)$ между ошибками прогноза за смежные сутки по проверяемой методике и по альтернативному методу. Рекомендуется использовать наибольшее по абсолютной величине значение $r(1)$ этих двух коэффициентов автокорреляции. Его статистическая достоверность устанавливается с помощью критерия Андерсона [13, 17].

При наличии статистически достоверной автокорреляции рядов ошибок прогнозов показатель эффективности методики краткосрочного прогнозирования, для которой $N = nT$, следует рассчитывать по более сложной формуле, полученной в предположении о нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза и соответствия их последовательностей простейшей модели авторегрессии первого порядка:

$$K = 0,15 \left\{ 1 + (N-1) \left[\frac{1-r^2(1)}{1+r^2(1)} \right] \right\} \ln \left[1 + \frac{(\sigma_\Delta^2 - S^2)^2}{4\sigma_\Delta^2 S^2 (1-r^2)} \right]. \quad (1.21)$$

При отсутствии такой автокорреляции величину $r(1)$ следует принимать равной нулю. В этом случае формула (1.21) превращается в формулу (1.20).

Пример 9

Для методики прогнозирования ежедневных расходов воды реки Ока у г. Калуга в течение всего года с заблаговременностью 3 суток с использованием моделей DWAT и COSMO-Ru показатель эффективности $S/\sigma_{\Delta} = 0,81$ оказался неудовлетворительным. Проверка на независимом материале по данным наблюдений за 2013 год дала следующие значения погрешности методики и инерционного прогноза: $S = 205 \text{ м}^3/\text{с}$; $\sigma_{\Delta} = 252 \text{ м}^3/\text{с}$. Оценка коэффициента корреляции между синхронными ошибками прогнозов по проверяемой методике и инерционного прогноза равна $r = 0,21$. Коэффициенты автокорреляции рядов ошибок прогноза по проверяемой методике и инерционного прогноза оказались статистически достоверными, практически одинаковыми и равными $r(1) = 0,84$. Рассчитанный по формуле (1.20) показатель K равен 0,48. Следовательно, использование данного статистически более обоснованного показателя эффективности методики прогноза позволяет признать ее удовлетворительной.

Назначение в Наставлении по службе прогнозов [63] допустимого предела для ошибок прогнозов $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$ обусловлено тем, что при нормальном распределении вероятностей ошибок альтернативного прогноза вероятность допустимой ошибки приближается к 50 % с увеличением продолжительности ряда проверочных прогнозов. Исходя из этого, предварительный вывод о достаточно высокой оправдываемости гидрологических прогнозов делается при условии $P \geq 60\%$ [5].

Однако распределению вероятностей ошибок альтернативного прогноза может отличаться от нормального. В связи с этим окончательный вывод о том, что проверяемый метод имеет достаточно высокую оправдываемость прогнозов следует делать при условии, что частота P явно превосходит оправдываемость альтернативного прогноза прогнозов P_A , которая определяется аналогичным образом по ряду ошибок соответствующих ему проверочных прогнозов [13].

Для сравнения этих частот следует применять критерий, в соответствии с которым неравенство $P > P_A$ является статистически достоверным при уровне значимости $\alpha = 5\%$, если выполняется условие:

$$M = \frac{\sqrt{N}(P - P_A)}{\sqrt{P(1-P) + P_A(1-P_A) - 2(P_{M,A} - PP_A)}} > 1,64, \quad (1.22)$$

где $P_{M,A}$ – частота случаев, когда ошибки прогноза по проверяемому методу и ошибки альтернативного прогноза являются допустимыми одновременно. При этом все значения частот P , P_A и $P_{M,A}$ в формулу (1.21) следует подставлять не в процентах, а в сотых долях [13].

Пример 10

В целях долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в течение маловодного периода года использован метод, разработанный в ФГБУ «Гидрометцентре России». По результатам его проверки за период с 1985 по 2018 год минимальная оправдываемость прогнозов $P = 66\%$ получена для февраля. Оправдываемость используемого в качестве альтернативы климатического прогноза для этого месяца равна $P_A = 53\%$, а частота одновременно допустимых ошибок климатического прогноза и прогноза по проверяемому методу равна $P_{M,A} = 48\%$. При таких частотах и $n = 34$ показатель равен $M = 2,11$. Следовательно, условие (1.22) выполняется, неравенство $P > P_A$ является статистически достоверным, а проверяемый метод имеет достаточно высокую оправдываемость прогнозов.

К сожалению, предложенный в работах [13, 22] математически более обоснованный подход к оценке эффективности методик прогнозирования речного стока еще только предполагается быть включенным в новое издание нормативных документов, поэтому в последующем изложении используется действующее Наставление по службе прогнозов 1962 года [63].

Показатель эффективности прогнозов Нэша – Сатклиффа

В настоящее время в большинстве стран мира, а в последние годы и в России используется опубликованный в 1970 году показатель Нэша – Сатклиффа [142]. Данный показатель вполне подходит для оценки качества модели и в ряде случаев подходит для оценки эффективности применения использующей данную модель методики прогнозирования.

При получении данного показателя анализируется ряд $(Y_1, \tilde{Y}_1), \dots, (Y_N, \tilde{Y}_N)$ фактических значений характеристики речного стока и ее прогнозов. Для краткосрочных прогнозов и некоторых среднесрочных прогнозов, которые выпускаются ежедневно в течение всего года или достаточно продолжительной генетически однородной фазы водного режима, такой ряд может быть получен в результате проверочных прогнозов в течение 2–3 лет. Для долгосрочных прогнозов и некоторых среднесрочных прогнозов, выпускаемых один раз в год, такой ряд может быть получен только в результате проверочных прогнозов на протяжении многолетнего периода.

Показатель Нэша – Сатклиффа рассчитывается по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (1.23)$$

где \bar{Y} – среднее арифметическое ряда Y_1, \dots, Y_N фактических значений моделируемой характеристики [142]. Данный показатель не превышает единицу, причем равенство $NSE = 1$ достигается при абсолютно точной модели, обеспечивающей совпадение величин Y и \tilde{Y} . Равенство $NSE = 0$ означает, что моделирование является столь же точным, как расчет величины Y по ее среднему значению \bar{Y} . Отрицательные значения NSE свидетельствуют о совершенно неудовлетворительных результатах моделирования.

Применению показателя Нэша – Сатклиффа для оценки эффективности различных гидрологических моделей и свойствам этого показателя посвящено большое количество работ [40, 126, 134, 148]. В работе [139] предлагается следующая классификация качества моделей: модель может считаться хорошей при условии $NSE \geq 0,80$; удовлетворительной при условии $0,36 \leq NSE < 0,80$; неудовлетворительной при условии $NSE < 0,36$.

В основе показателя эффективности модели Нэша – Сатклиффа лежит идея корреляционного отношения Пирсона K [13, 17]. Он учитывает среднеквадратическую погрешность S оцениваемой методики и погрешность климатического прогноза σ . Пренебрегая незначительным отличием величины $\frac{N}{N-1}$ от единицы, показатель NSE может быть достаточно точно выражен формулой:

$$NSE = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2}. \quad (1.24)$$

Таким образом, показатель Нэша – Сатклиффа вполне подходит для оценки эффективности долгосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока, для которых в качестве альтернативы используется климатический прогноз [13, 22]. По аналогии с этим показателем для краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов, для которых в качестве альтернативы используется инерционный прогноз, в качестве показателя их эффективности можно предложить следующую величину:

$$NSE_{\Delta} = 1 - \frac{S^2}{\sigma_{\Delta}^2}. \quad (1.25)$$

Что же касается показателя Нэша – Сатклиффа, то при его использовании для оценки эффективности таких краткосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока могут возникать проблемы, которые можно проиллюстрировать следующими примерами.

Возможна и обратная ситуация, когда использование модели формирования стока с низким значением показателя Нэша – Сатклиффа позволяет получать вполне удовлетворительные прогнозы по показателю S/σ_{Δ} .

Пример 11

В целях краткосрочного и среднесрочного прогнозирования ежедневных расходов воды реки Коса (правый приток Камы) у с. Коса в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика, основанная на экстраполяции гидрографа [18]. Для всех указанных значений заблаговременности методика показала удовлетворительную эффективность по сравнению с инерционным прогнозом по показателю S/σ_{Δ} . В частности, даже при заблаговременности 10 суток этот показатель оказался равным $S/\sigma_{\Delta} = 0,76$. В то же время показатель Нэша – Сатклиффа при такой заблаговременности оказался довольно низким ($NSE = 0,47$). Такое сочетание показателей обусловлено тем, что при столь большой заблаговременности среднеквадратическая погрешность инерционного прогноза $\sigma_{\Delta} = 92,2 \text{ м}^3/\text{с}$ уже близка к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины $\sigma = 96,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Неоднозначность оценки качества прогнозов

Использование отношения S/σ_{Δ} в качестве показателя качества краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока также требует определенной осторожности. Согласно работе лауреата Нобелевской премии Д. Канемана, при оценке эффективности какой-либо методики прогнозирования необходимо различать ее верификацию и валидацию. В процессе верификации методики проверяется ее соответствие требованиям разработчика. В процессе валидации методики проверяется ее соответствие требованиям потребителя [131]. В рассматриваемом случае успешность верификации методики прогнозирования речного стока определяется соотношением S/σ_{Δ} и оправдываемостью получаемых с ее помощью прогнозов. Успешность валидации методики целиком определяется мнением потребителя получаемых с ее помощью прогнозов. При этом успешность верификации не гарантирует успешность валидации и наоборот. Данную ситуацию наглядно демонстрирует следующий пример.

Пример 12

Для реки Амур, для которой характерно прохождение приводящих к наводнениям опасных высоких паводков в летне-осенний период, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика краткосрочного прогнозирования уровней воды [15, 97]. Использован классический метод соответственных уровней, который позволяет описывать трансформацию волн паводков на отдельных участках реки [37, 78]. В табл. 1.6 приведены название пункта расположения прогнозируемого речного створа, заблаговременность прогноза Δt суток, коэффициент корреляции R между фактическими значениями уровней воды и их прогнозами, среднеквадратическая погрешность прогнозов S см и отношение S/σ_{Δ} .

Таблица 1.6

Показатели качества прогнозов уровней воды на реке Амур

Пункт	Δt суток	R	S см	S/σ_{Δ}
с. Джалинда	1	0,977	34	0,82
с. Кумара	2	0,994	20	0,79
г. Благовещенск	5	0,996	19	0,81
с. Константиновка	1	0,992	14	0,82
с. Иннокентьевка	2	0,991	17	0,86
с. Нагибово	1	0,996	13	0,95
г. Хабаровск	2	0,997	24	0,88
г. Комсомольск-на-Амуре	3	0,998	11	0,88

За исключением одного случая для створа р. Амур – с. Кумара, все значения S/σ_{Δ} превышают 0,80, что свидетельствует о неудовлетворительности прогнозов с точки зрения принятых в отечественной практике гидрологического прогнозирования правил. Однако значения коэффициента корреляции R очень высоки и близки к единице. При таких значениях R фактические значения уровней воды незначительно отличаются от прогнозируемых, что демонстрирует рис. 1.3.

Противоречие между показателями качества прогнозов R и S/σ_{Δ} обусловлено тем, что при характерном для реки Амур плавном изменении уровней воды в течение всего года и невысокой заблаговременности прогноза $\Delta t = 3$ суток погрешность инерционного прогноза σ_{Δ} по сравнению с величиной S относительно невелика [39, 97].

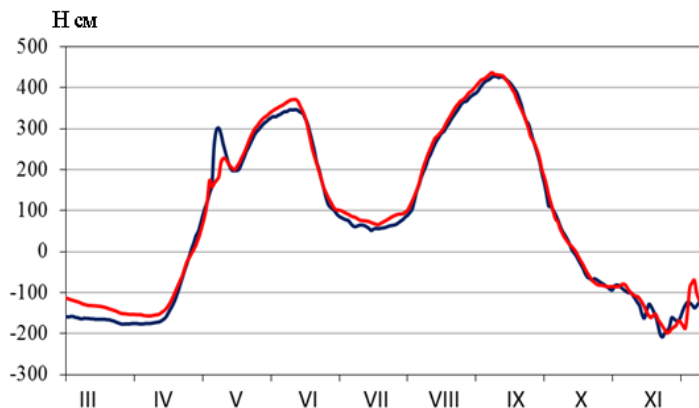


Рис. 1.3. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) ход уровней воды в створе р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре в 2010 году.

Несмотря на неудовлетворительные с точки зрения гидрологов-прогнозистов результаты верификации данной методики, она была передана в МЧС России, где получила одобрение и используется для предупреждения об угрозе наводнений на реке Амур. Таким образом, при неудовлетворительных результатах верификации методики ее валидация оказалась вполне успешной.

Таким образом, оценка качества методики прогнозирования речного стока не всегда имеет простое решение. Ни ее теоретическая обоснованность, ни объем используемой гидрометеорологической информации, ни уровень программного обеспечения ее реализации еще не гарантируют высокой оценки ее качества. При этом целесообразно обратить внимание на приведенные в разделе 1.2 показатели качества прогнозов, из которых следует, что оно в значительной степени определяется дешевизной их получения и простотой составления [164].

С учетом изложенных обстоятельств, при выборе методик прогнозирования речного стока рекомендуется исходить из принципа, сформулированного философом Уильямом Оккамом, согласно которому поиск решений какой-либо научной проблемы следует начинать с простейших вариантов [9]. В целях реализации данного принципа в следующей главе излагается метод получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды путем экстраполяции их изменения во времени. Как и рассмотренные выше альтернативные прогнозы, метод экстраполяции гидрографа основан на статистическом анализе данных только о самой прогнозируемой характеристике, отличается простотой и минимальной трудоемкостью.

Глава 2.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
РЕЧНОГО СТОКА МЕТОДОМ
ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ГИДРОГРАФА****2.1. Метод экстраполяции гидрографа***Описание метода*

В 2021 году в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов стока рек России на основе метода экстраполяции гидрографа (см. главу 5). Основная идея метода состоит в следующем.

Характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов и уровней воды в течение года дает основание для простейшего варианта их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа текущего года. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(\Delta t) + \dots + c_k(t)\varphi_k(\Delta t), \quad (2.1)$$

где $\varphi_1(\Delta t), \dots, \varphi_k(\Delta t)$ – некоторые заданные функции. Например, при $\varphi_1(\Delta t) = \Delta t, \dots, \varphi_k(\Delta t) = (\Delta t)^k$ формула (2.1) означает экстраполяцию гидрографа на Δt суток с помощью многочлена степени k . В частности, при значении $k = 1$ производится линейная экстраполяция, а при значении $k = 2$ – параболическая. В зависимости от даты составления прогноза t входящие в формулу (2.1) коэффициенты $c_0(t), c_1(t), \dots, c_k(t)$ определяются исходя из предположения о том, что последовательность наблюдавшихся расходов $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$ для даты составления прогноза и для k предыдущих суток описывается тем же обобщенным полиномом. Данное предположение выражается в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q(t-i) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(-i) + \dots + c_k(t)\varphi_k(-i), \\ i = 0, 1, \dots, k. \end{cases} \quad (2.2)$$

Решение системы (2.2) приводит к тому, что коэффициенты $c_0(t)$, $c_1(t)$, ..., $c_k(t)$ линейно выражаются через расходы $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$. После подстановки этих выражений в формулу (2.1), она приобретает вид:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (2.3)$$

где $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной формулы, зависящие от заблаговременности прогноза Δt и подлежащие оценке по данным гидрологических наблюдений.

Таким образом, экстраполяция гидрографа с помощью любого полинома вида (2.1) приводит к тому, что прогноз $\hat{Q}(t + \Delta t)$ выражается в виде линейной комбинации соответствующего дате составления прогноза расхода воды $Q(t)$ и k предыдущих расходов $Q(t-1)$, ..., $Q(t-k)$. По существу, данный метод использует идею фильтра Н. Винера, широко используемого для экстраполяции случайных процессов [157].

Определяемые формулой (2.3) величины $\hat{Q}(t + \Delta t)$ могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения $\hat{Q}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения $\hat{Q}(t + \Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов и уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (2.3) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\hat{Q}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min Q$ или максимумом $\max Q$ [21, 23]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (2.4)$$

Обобщенная экстраполяция хода среднесуточных уровней воды приводит к аналогичной формуле, которая выражает прогноз уровня воды $\hat{H}(t + \Delta t)$ в виде линейной комбинации известного к дате составления прогноза среднесуточного уровня $H(t)$ и k уровней $H(t-1), \dots, H(t-k)$ за предшествующие сутки:

$$\hat{H}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)H(t-i) + b(\Delta t). \quad (2.5)$$

Результаты применения формулы (2.5) корректируются аналогичным образом путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t + \Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (2.6)$$

Данный метод может применяться для краткосрочного или среднесрочного прогнозирования речного стока в течение определенной фазы водного режима или в течение всего года. Он не является чисто формальным, так как учитываемые в формулах (2.3) и (2.5) расходы и уровни воды за $k + 1$ суток косвенно характеризуют поступление талых или дождевых вод, пополнение или истощение почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение русловых и пойменных запасов воды и трансформацию волны половодья или паводка в течение предшествующего периода. Возможности использования данного метода подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных прогнозов стока рек бассейна Камского водохранилища [18].

Реализация метода

Метод экстраполяции гидрографа использован для прогнозирования в течение всего года среднесуточных расходов и уровней воды в оборудованных гидрологических постами речных створах, расположенных по всей территории России. Среднесуточные уровни воды прогнозировались для 2776 створов (рис 2.1). Среднесуточные расходы воды прогнозировались для 2098 створов.

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формул (2.3) или (2.5)

оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020. Входящие в формулы (2.4) и (2.6) минимальные и максимальные значения расходов и уровней воды определялись по тому же ряду и должны ежегодно пересчитываться по мере поступления новых данных наблюдений.

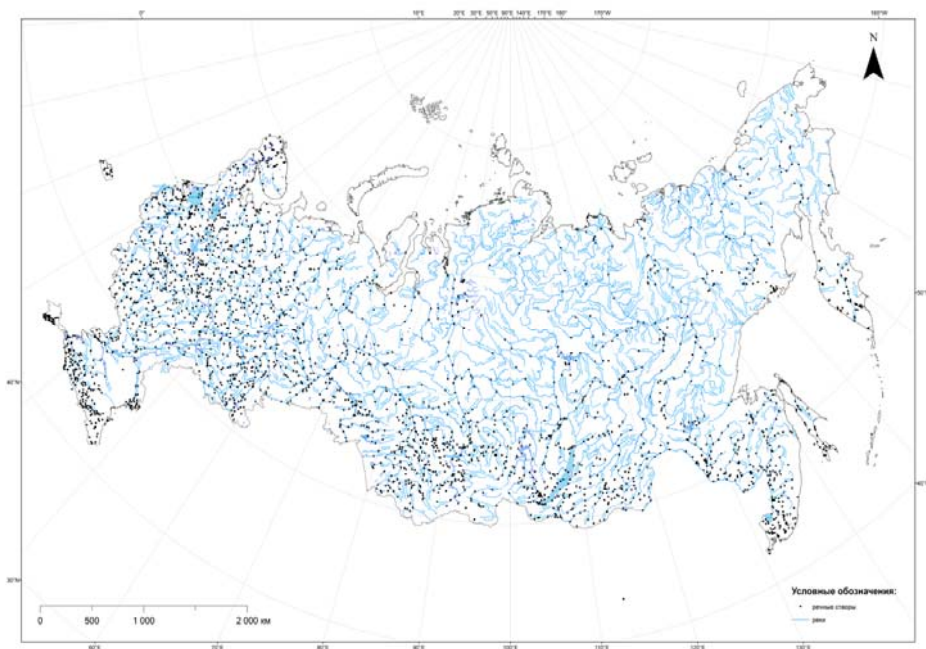


Рис. 2.1. Расположение анализируемых речных створов.

При каждом значении заблаговременности Δt от 1 до 10 суток для формул (2.3) и (2.5) подбиралось оптимальное число k , при котором среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение. Анализ показал, что для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток такие оптимальные значения параметра k не превышали 5. На этом основании все прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды определялись с помощью формул (2.3) и (2.5) при $k = 5$.

В качестве примера в табл. 2.1 приведены параметры формул (2.3) и (2.4) для получения прогнозов среднесуточных расходов воды в створе на реке Дон у города Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

Таблица 2.1

Параметры формул (2.3) и (2.4) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$\min Q$	$\max Q$
1	1,435	-0,309	-0,082	0,053	-0,048	-0,054	2,21	148	5531
2	1,746	-0,522	-0,068	0,015	-0,065	-0,118	5,48	148	5531
3	1,981	-0,605	-0,129	0,02	-0,169	-0,117	9,41	148	5531
4	2,236	-0,740	-0,143	-0,068	-0,199	-0,116	13,84	148	5531
5	2,462	-0,829	-0,255	-0,099	-0,141	-0,178	18,90	148	5531
6	2,689	-1,007	-0,309	-0,048	-0,128	-0,249	24,57	148	5531
7	2,829	-1,126	-0,282	-0,046	-0,105	-0,335	30,87	148	5531
8	2,898	-1,136	-0,299	-0,044	-0,064	-0,435	37,65	148	5531
9	2,977	-1,168	-0,309	-0,025	-0,050	-0,52	44,75	148	5531
10	3,116	-1,208	-0,315	-0,037	-0,027	-0,658	60,09	148	5531

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке *Python* (версия 3.4) разработано программное обеспечение, которое включает следующие этапы:

- считывание и обработку данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценку параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценку показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [23].

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля (*Cross-Validation Method*), изложенная в разделе 1.2.

1. Из 11-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 10 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (2.3) и (2.4) или (2.5) и (2.6) для прогнозирования расходов или уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) 366 суток.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 11 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

Таким образом, были получены оценки среднеквадратической погрешности прогноза S и его оправдываемости P .

В качестве примера в табл. 2.2 для прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

- R – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;
- S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, м³/с;
- σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, м³/с;
- S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;
- P – оправдываемость прогнозов.

На рис. 2.2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток расходов воды в 2016 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом расходов воды перед датой составления прогноза.

Анализ результатов

Анализ результатов верификации прогнозов расходов и уровней воды в речных створах России позволяет оценить возможности используемого метода экстраполяции гидрографа и внедряемой системы автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов.

Таблица 2.2

**Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды
в створе р. Дон – г. Серафимович**

Δt	R	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}	P
1	0,9995	22,3	38,3	0,58	91%
2	0,998	41,8	72,7	0,58	86%
3	0,996	63,0	106	0,59	85%
4	0,993	84,1	139	0,61	84%
5	0,989	109	171	0,64	84%
6	0,983	134	202	0,66	85%
7	0,975	160	232	0,69	83%
8	0,967	185	260	0,71	84%
9	0,957	209	288	0,72	83%
10	0,937	253	341	0,74	83%

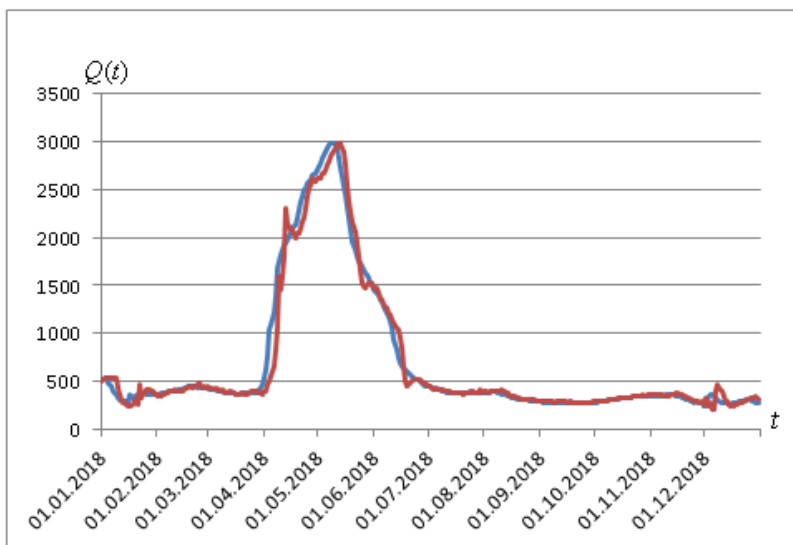


Рис. 2.2. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток (красным) гидрографы в створе р. Дон – г. Серафимович в 2016 году.

Эти возможности демонстрирует табл. 2.3, в которой для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов, для которых получены хорошие и удовлетворительные прогнозы расходов Q м³/с и уровней воды H см с показателем $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и оправдываемостью $P > 60$ %.

Таблица 2.3

Число речных створов с хорошими и удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q м ³ /с	1000	723	545	456	382	328	301	277	258	240
H см	1262	909	704	558	461	384	337	294	252	223

Приведенные в таблице данные показывают, что с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки удовлетворительные прогнозы расходов воды могут быть получены для 1000 створов, а уровней воды – для 1262 створов; с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток для 723 створов (расходы Q) и для 909 створов (уровни H) и т. д. При этом в число створов с удовлетворительными прогнозами при заблаговременности Δt входят и створы, для которых получены удовлетворительные прогнозы с большей заблаговременностью.

Обращает на себя внимание, что с максимальной для среднесрочных прогнозов заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды – для 223 створов.

Если использовать рассмотренный в разделе 1.4 более совершенный критерий проверки статистической достоверности неравенства S/σ_{Δ} , то число случаев хороших и удовлетворительных прогнозов значительно возрастает.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографов оказался неприменимым для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора, в частности для малых горных рек. Расположенные на таких реках створы дали приблизительно половину случаев, когда прогнозы расходов и уровней воды оказались неудовлетворительными даже при минимальной заблаговременности $\Delta t = 1$. Это объясняется тем, что при малых размерах и больших уклонах водосбора речной сток очень быстро, часто за несколько часов реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков [14]. В результате водный режим определяется серией

кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных расходов и уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки. Для таких рек необходимо использование методов, применяемых для прогнозирования быстроразвивающихся паводков, к примеру методов, которые основаны на моделировании процессов формирования речного стока.

Для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора ход среднесуточных расходов и уровней имеет, как правило, плавный характер, как на рис. 2.2, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью. Для таких крупнейших российских рек, как Амур, Лена, Енисей, Обь, Иртыш, Тобол, Кама, Дон, Северная Двина и Печора этот метод дает не только удовлетворительные, но и хорошие прогнозы с заблаговременностью до 10 суток.

С увеличением заблаговременности прогноза Δt его среднеквадратическая погрешность S всегда возрастает. Растет и погрешность σ_{Δ} инерционного прогноза. В то же время изменение показателя эффективности прогноза S/σ_{Δ} и его оправдываемости P может иметь более сложный характер. Для крупных рек с очень плавным очертанием гидрографов при прогнозировании расходов или уровней воды с небольшой заблаговременностью $\Delta t = 1-3$ суток малая величина S может сочетаться с настолько малой величиной σ_{Δ} , что показатель S/σ_{Δ} может превысить критическое значение 0,80. В то же время при дальнейшем росте заблаговременности Δt прогнозы становятся удовлетворительными. Пример такой ситуации демонстрирует табл. 2.4 с аномальным характером изменения показателя эффективности прогнозов уровней воды в реке Иртыш у города Ханты-Мансийск (площадь водосбора 1 650 000 км²) с ростом их заблаговременности.

Таблица 2.4

Значения показателя эффективности прогноза уровней воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/σ_{Δ}	0,83	0,78	0,78	0,77	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74

В связи с этим в предлагаемой работе используется другой показатель качества прогнозирования характеристик речного стока с заблаговременностью Δt – коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между их фактическими и прогнозируемыми значениями. При прогнозировании

среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа показатель $R(\Delta t)$ равен множественному коэффициенту корреляции между прогнозируемым расходом воды $Q(t + \Delta t)$ и известными к дате составления прогноза t расходами $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-5)$. Квадрат этой величины $R^2(\Delta t)$ равен широко используемому в зарубежной практике моделирования и прогнозирования речного стока показателю Нэша – Сатклиффа [142]. Величина $R(\Delta t)$ всегда снижается с ростом заблаговременности прогноза Δt , а неравенство $R(\Delta t) > 0,9$, как правило, обеспечивает удовлетворительность прогнозов по показателям S/σ_{Δ} и P .

С учетом отмеченных обстоятельств показатель Δ_{\max} прогнозируемости стока в конкретном речном створе определяется таким образом, что прогнозы, для которых выполняется условие $R(\Delta t) > 0,9$, могут быть получены при всех значениях заблаговременности Δt , не превышающих величину Δ_{\max} .

Из данного определения следует, что при условии $\Delta_{\max} = 10$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между фактическими значениями расходов воды и их прогнозами превышает величину 0,9 при всех значениях заблаговременности Δt от 1 до 10 суток, что означает удовлетворительность прогнозов среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа при любой рассматриваемой заблаговременности. При условии $\Delta_{\max} = 0$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ оказывается меньше 0,9 даже при заблаговременности одни сутки, что означает неудовлетворительность прогнозов данным методом при любой заблаговременности.

Показатель Δ_{\max} можно рассматривать как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, так как в большинстве случаев его значения незначительно отличаются от аналогичной по сути, но несколько иначе определяемой величины, рассмотренной в работах [18, 23].

При использовании метода экстраполяции гидрографа показатель Δ_{\max} в максимально полной степени характеризует плавность изменения расходов воды во времени и возможность его предсказания. Таким образом, он является оригинальной, но весьма важной с практической точки зрения характеристикой водного режима реки. Его главное предназначение – оценка возможностей прогнозировать сток рек России методом экстраполяции гидрографа, которой посвящен следующий раздел настоящей главы.

2.2. Возможности прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа

Показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа

Оценка прогнозируемости стока конкретной реки различными методами в зависимости от характеристик ее водосбора представляет несомненный научный и практический интерес, так как позволяет заранее ориентироваться на наиболее подходящие методы прогнозирования и отбрасывать заведомо неприемлемые.

Метод экстраполяции гидрографа позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы с максимальной заблаговременностью для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора. Для таких рек медленное формирование речного стока обеспечивает плавные очертания гидрографа, который можно достаточно точно экстраполировать на значительный промежуток времени. Для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора формирование стока происходит быстро, поэтому ход среднесуточных расходов имеет пилообразный характер и его сложно предсказывать с достаточной точностью даже на ближайшие сутки [23].

В современной гидрологии факторы формирования речного стока и особенности его колебаний во времени достаточно хорошо изучены. Ведущими из них являются климат и ландшафтная структура водосбора [46, 48, 107, 122, 128]. Следовательно, учет морфометрических характеристик водосбора конкретной реки при оценке прогнозируемости ее стока методом экстраполяции гидрографа возможен только в пределах достаточно однородного в географическом отношении региона. Решение такой задачи рассматривается ниже.

Используемые морфометрические характеристики водосборов

При исследовании зависимости показателя Δ_{\max} от характеристик соответствующих водосборов использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России.

Особенности гидрографов каждого речного створа определяются режимом выпадения осадков и температуры воздуха, особенностями подстилающей поверхности, формой и размерами водосбора, а также факторами хозяйственной деятельности, влияющими на водный режим реки [79, 124, 137]. Для водосборов, находящихся в одинаковых природных условиях, решающее значение имеют их морфометрические характеристики, которые определяют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков. При прочих

равных условиях эта скорость определяется временем склонового и руслового добегания [48, 107].

С учетом данного обстоятельства среди различных морфометрических характеристик водосбора в качестве основных выбраны его площадь A и средний уклон его поверхности I .

Площадь водосбора характеризует расстояние до замыкающего створа, которое преодолевают талые, дождевые и подземные воды. Кроме того, с увеличением площади водосбора растет число притоков с несинхронными колебаниями водности, и суперпозиция поступающих в основное русло расходов воды этих притоков сглаживает гидрограф в замыкающем створе. Средний уклон водосбора характеризует скорость поверхностного, внутрпочвенного и подземного стекания воды по склонам и скорость движения воды в русловой сети. Таким образом, при прочих равных условиях плавность изменения расходов воды во времени должна возрастать с увеличением площади водосбора и уменьшением его среднего уклона [48, 128]. Следовательно, с увеличением A и уменьшением I показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа Δ_{\max} также должен расти.

В качестве примера на рис. 2.3 и 2.4 представлены гидрографы 2018 года для расположенного выше Цимлянского водохранилища створа реки Дон у станции Новогригорьевская и створа его притока второго порядка – реки Ворона у села Чутановка.

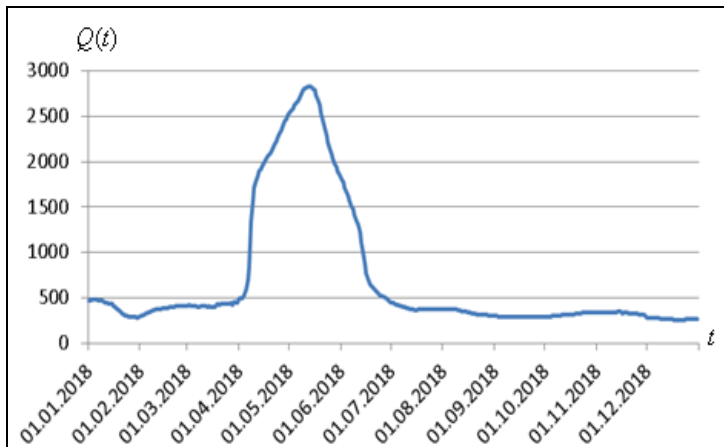


Рис. 2.3. Гидрограф 2018 года в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская с характеристиками: $A = 208000 \text{ км}^2$, $I = 0,56 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 10$ суток.

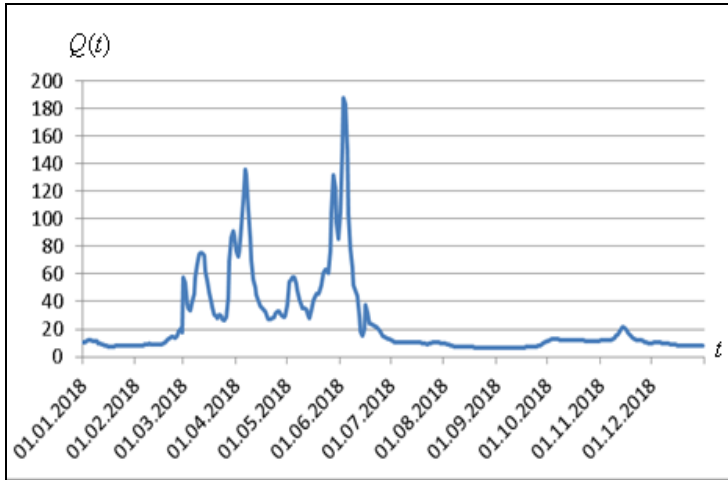


Рис. 2.4. Гидрограф 2018 года в створе р. Ворона – с. Чутановка с характеристиками: $A = 5560 \text{ км}^2$, $I = 0,89 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 1$ сутки.

Первый водосбор имеет в 37,4 раза большую площадь, в 1,6 раза меньший уклон и значительно более плавные очертания гидрографа. В результате показатель прогнозируемости расходов воды для реки Дон составляет $\Delta_{\max} = 10$ суток, а для его притока всего $\Delta_{\max} = 1$ сутки.

Значения площади водосборов взяты из перечня действующих постов сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665) [70].

Средний уклон поверхности водосбора рассчитан помощью цифровой модели рельефа всей территории России с пространственным разрешением 1 км, созданной на основе топографических карт масштаба 1:100 000. В качестве замыкающего створа использованы координаты гидрологического поста.

В качестве исходных данных использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России. Среди них отсутствуют створы на реках, естественный водный режим которых существенно нарушен водохранилищами, расположенными выше по течению. Для каждого речного створа по данным ежедневных наблюдений была рассчитана максимальная заблаговременность прогноза расходов воды методом экстраполяции гидрографа Δ_{\max} и получены значения площади A и среднего уклона поверхности водосбора I .

Среднее для всех этих речных створов значение площади водосбора равно $\bar{A} = 25\,634 \text{ км}^2$, Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(A) = 6,09$. Среднее значение уклона водосбора равно $\bar{I} = 1,96 \text{ ‰}$. Относительная изменчивость этой

величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(I) = 1,23$. Таким образом, относительная изменчивость площадей водосборов почти в 5 раз превышает относительную изменчивость их средних уклонов. Уже только это обстоятельство делает площадь водосбора более значимым аргументом при построении эмпирических зависимостей показателя Δ_{\max} от характеристик A и I .

В качестве первого приближения анализировалась зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади водосбора A и от среднего уклона его поверхности I для всей территории России по данным всех 1879 речных створов. С этой целью рассматривались различные варианты функции $f(A, I)$, для каждого из которых оценивался коэффициент корреляции r между $f(A, I)$ и показателем Δ_{\max} . В качестве оптимального был выбран вариант $f(A, I)$, для которого коэффициент r принял максимальное значение. Таким оптимальным вариантом оказался логарифм площади водосбора $\ln(A)$. Максимальное значение r оказалось равным 0,50. Теснота зависимости Δ_{\max} от $\ln(A)$ оказалась недостаточной для оценки прогнозируемости стока в конкретных речных створах по известным для них значениям A и I . В связи с этим поиск более тесных зависимостей показателя Δ_{\max} от оптимального варианта функции $f(A, I)$ производился для относительно однородных в географическом отношении регионов.

***Зависимость прогнозируемости речного стока
от морфометрических характеристик водосбора
для отдельных регионов России***

В идеале регион, в котором может использоваться единая для всех входящих в него водосборов и достаточно тесная зависимость показателя прогнозируемости речного Δ_{\max} от их площади A и среднего уклона I , должен быть однородным по всем остальным условиям формирования водного режима рек, включая климат, рельеф, ландшафтную структуру, гидрогеологические условия и факторы хозяйственной деятельности. Однако стремление к максимальной географической однородности выделяемого региона вступает в противоречие с необходимостью выделения крупного региона с достаточно большим числом гидрологических постов, данные которых необходимы для построения регионально расчетной зависимости характеристики речного стока (в данном случае показателя Δ_{\max}) от морфометрических и других азональных характеристик водосбора [86].

С учетом отмеченных выше обстоятельств, при выделении регионов с единой расчетной зависимостью показателя Δ_{\max} от площади A и среднего уклона I входящих в этот регион водосборов преследовалась цель добиться по крайней мере его относительной географической однородности. Для достижения этой цели учитывалась информация, содержащаяся в Большом географическом атласе России [10]. Использовались полученные различными авторами карты типов водного режима рек СССР и России [48].

Процедура выделения каждого региона включала следующие этапы:

- выделения «ядра», образованного водосборами с достаточно близкими условиями формирования речного стока и его режима;
- предварительное определение оптимального варианта функции $f(A, I)$, имеющей максимальный коэффициент корреляции r с показателем Δ_{\max} ;
- добавление соседних водосборов, если представляющие их данные заметно не снижают коэффициент r ;
- уточнение оптимального варианта функции $f(A, I)$ и зависимости от него показателя Δ_{\max} ;
- отбрасывание соседних водосборов, если представляющие их данные заметно ухудшают эту зависимость [24].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что, как правило, при разработке автоматизированных систем подготовки и выпуска гидрологических прогнозов используется бассейновый принцип [79, 124, 137]. Исходя из этого, большинство регионов с единой расчетной зависимостью Δ_{\max} от A и I являются бассейнами крупных рек.

Регионы, совпадающие с огромными бассейнами Енисея, Лены и Амура, не могут считаться относительно однородными в географическом отношении. Однако в условиях характерной для них редкой сети гидрологических постов их дробление приводило к тому, что для некоторых вновь образованных регионов зависимость Δ_{\max} от A и I заметно улучшалась, а для других недопустимо ухудшалась.

Таким образом, выделено 18 регионов с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока Δ_{\max} от соответствующей каждому региону функции морфометрических характеристик водосбора $f(A, I)$. Эти регионы покрывают 79 % площади всей страны и представлены на рис. 2.5. В табл. 2.5 для каждого региона приведены его номер, название, число речных створов N , оптимальный для данного региона вариант функции $f(A, I)$ и коэффициент его корреляции r с показателем Δ_{\max} [24].

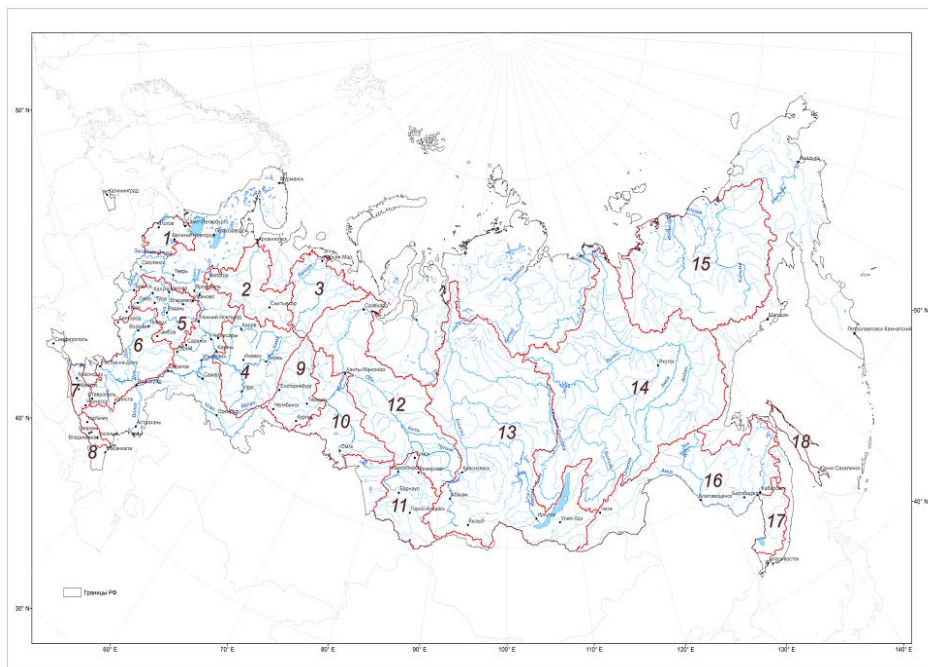


Рис. 2.5. Регионы с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока от функции морфометрических характеристик $f(A, I)$.

В приведенной таблице обращает на себя внимание, что использование для бассейна Терека в качестве оптимального аргумента $f(A, I) = \ln(A) + 1,3 \ln(I)$ свидетельствует о том, что в данном регионе максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} увеличивается с ростом среднего уклона поверхности речного бассейна. Столь неожиданный результат имеет достаточно простое объяснение.

Наибольшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном высоко в горах. Для них преобладает снеговое и ледниковое питание. Оно обеспечивает плавные очертания волны половодья и гидрографа в целом. Наименьшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном на равнине. Для них преобладает дождевое питание. Оно обеспечивает резкие очертания отдельных паводков и пилообразный характер гидрографа в целом [46, 48]. Таким образом, для бассейна Терека средний уклон поверхности речного бассейна косвенно характеризует расположение водосбора реки и режим ее питания, а он в свою очередь определяет особенности очертаний гидрографа и возможности его экстраполяции.

Таблица 2.5

Характеристики выделенных регионов

№	Регион	N	Вид $f(A, I)$	r
1	Северо-Запад России	71	$\ln(A)$	0,76
2	Бассейн Северной Двины	75	$\ln(A)$	0,77
3	Бассейн Печоры	46	A	0,84
4	Бассейн Камы	129	$\sqrt{A/I}$	0,82
5	Бассейн Оки	66	$\sqrt{A/I}$	0,84
6	Бассейн Дона	75	$\ln(A)$	0,80
7	Бассейн Кубани	25	$\sqrt{A/I}$	0,77
8	Бассейн Терека	33	$\ln(A) + 1,3 \ln(I)$	0,76
9	Бассейн Тобола	36	$\ln(A)$	0,81
10	Бассейн Иртыша	78	$\ln(A/I)$	0,80
11	Бассейн Верхней Оби	162	$\sqrt{A/I}$	0,82
12	Бассейн Нижней Оби	32	$\ln(A)$	0,91
13	Бассейн Енисея	80	$\sqrt{A/I}$	0,76
14	Бассейн Лены	88	$\ln(A/I)$	0,75
15	Северо-Восток России	63	$\ln(A) - 4 \ln(I)$	0,79
16	Бассейн Амура	54	$\ln(A)$	0,88
17	Приморье	43	A	0,75
18	Сахалин	25	$\sqrt{A/I}$	0,75

Метод экстраполяции гидрографа применялся для получения прогноза расходов воды с заблаговременностью Δt от 1 до 10 суток. В связи с этим значения показателя Δ_{\max} , определяющего максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, также ограничены 10 сутками. В результате для многих регионов зависимость этого показателя от морфометрического аргумента $f(A, I)$ становится нелинейной по мере его увеличения и приближения величины Δ_{\max} к 10. Это приводит к тому, что коэффициент корреляции r , который характеризует тесноту статистической связи и степень ее линейности, занижает фактическую тесноту зависимости Δ_{\max} от аргумента $f(A, I)$. Если бы расходы воды прогнозировались с заблаговременностью более 10 суток,

характер этой зависимости имел бы линейный характер во всем диапазоне анализируемых значений и коэффициенты корреляции r были бы больше.

Для всех выделенных регионов зависимость показателя Δ_{\max} от оптимального варианта функции морфометрических характеристик $f(A, I)$ оказалась недостаточно тесной для надежного определения максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов расхода воды в речном створе при известных значениях площади A и среднего уклона поверхности I его водосбора. Однако эти зависимости позволяют оценить предельно низкое значение $f(A, I)$, которое обеспечивает удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью, и предельно высокое, при котором удовлетворительные прогнозы возможны только с малой заблаговременностью или невозможны вообще ($\Delta_{\max} = 0$).

Ниже приводятся примеры подобных расчетов для некоторых регионов России [24].

На рис. 2.6 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России (Ленинградская область, часть Псковской и Новгородской областей).

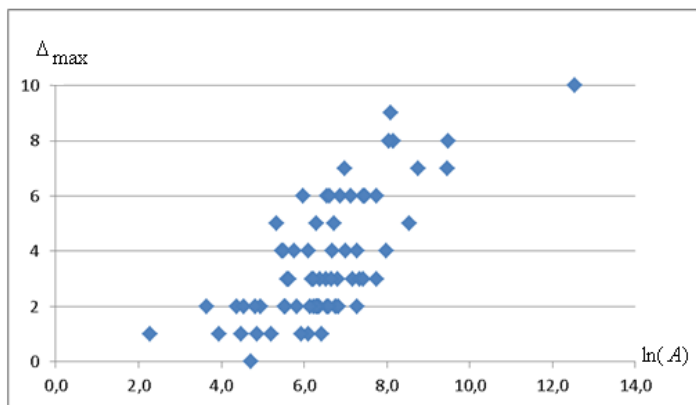


Рис. 2.6. График зависимости показателя Δ_{\max} от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России.

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

- для речных створов с показателями $\ln(A) > 9$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;

– для речных створов с показателями $\ln(A) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рис. 2.7 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки.

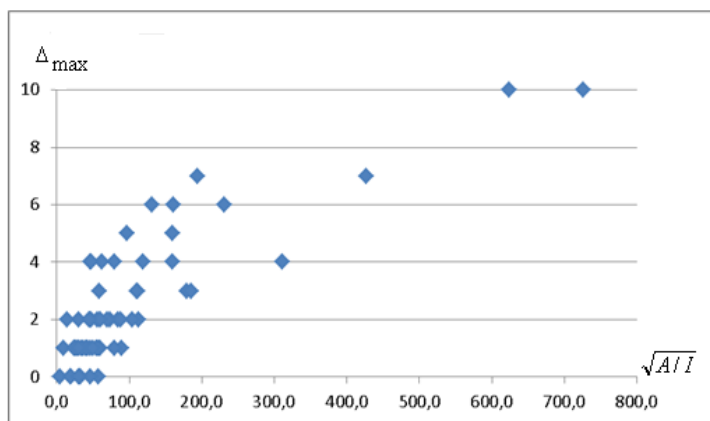


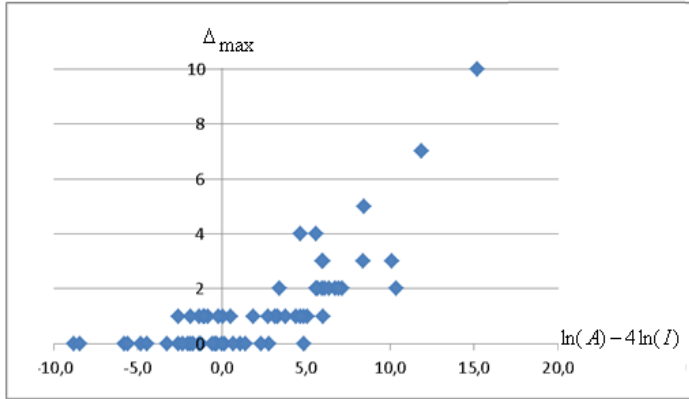
Рис. 2.7. График зависимости показателя Δ_{\max} от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки.

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} > 400$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} < 50$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток

На рис. 2.8 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} от величины $\ln(A) - 4 \ln(I)$, полученный для Северо-Востока России (бассейны Яны, Индигирки, Колымы).

Данный график позволяет сделать следующие выводы: для речных створов с показателями $\ln(A) - 4 \ln(I) > 12$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\ln(A) - 4 \ln(I) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет

получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.



с заблаговременностью не менее 7 суток; для речных створов с показателями $\ln(A) < 7$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более суток.

Полученные региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью, или наоборот, только с малой заблаговременностью, или невозможны вообще [24].

Примеры использования метода экстраполяции гидрографа для прогнозирования стока рек бассейна Тобола и Дона приведены в следующих разделах.

2.3. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды в речных створах бассейна Тобола

Анализируемые речные бассейны

Основанная на методе экстраполяции гидрографа схема получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды получена для 64 створов, расположенных на реке Тобол и его притоках различных порядков. В табл. 2.6 для этих створов помещены номера гидрологических постов, название реки, пункта и площадь водосбора км².

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 2.10.

Прогнозирование среднесуточных уровней воды

При получении прогноза среднесуточных уровней воды используются формулы (2.5) и (2.6) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t), \dots, a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.5) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020. Входящие в формулу (2.6) допустимые минимум $\min H$ и максимум $\max H$ значений уровня воды определялись по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке *Python* (версия 3.4) разработана компьютерная программа. Она включает следующие этапы:

- считывание и обработку данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценку параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценку показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [23].

Таблица 2.6

**Основные характеристики исследуемых водосборов
бассейна Тобола**

Номер	Река	Пункт	Площадь, км ²
12010	Тобол	Звериноголовское	143000
12014	Тобол	Курган	159000
12017	Тобол	Упорово	177000
12018	Тобол	Ялуторовск	241000
12022	Тобол	Иевлево	333000
12040	Уй	Степное	3600
12043	Уй	Троицкий свх	7660
12059	Увелька	Красосельское	3620
12061	Увелька	Карсинский зсх	5100
12092	Юргамыш	Пертовское	1950
12098	Емуртла	Емуртла	3250
12101	Ук	Заводоуковск	917
12115	Исеть	Колюткино	3500
12123	Исеть	Катайск	12800
12125	Исеть	Шадринск	23400
12127	Исеть	Мехонское	52300
12129	Исеть	Исетское	56000
12136	Решетка	Новоалексеевское	32
12155	Синара	Верхнеключевское	5000
12189	Миасс	Новоандреевка	1830
12202	Миасс	Каргополье	21400
12222	Ирюм	Бобылево	778
12238	Тура	Санкино	23000
12239	Тура	Туринск	29000
12240	Тура	Туринская сл.	31500
12244	Тура	Тюмень ЦГМС	58500
12248	Тура	Покровское	80200

Номер	Река	Пункт	Площадь, км ²
12279	Тагил	Трошкова	7920
12305	Мугай	Топоркова	1400
12315	Ница	Ирбит	17300
12316	Ница	Краснослободское	22000
12320	Нейва	Черемшанка	1860
12346	Реж	Ключи	4400
12354	Бобровка	Липовское	101
12383	Пышма	Богандинское	18600
12401	Юрмыч	Пышма	935
12402	Беляковка	Потаскуева	1700
12407	Иска	Велижаны	895
12412	Тавда	Таборы	74200
12413	Тавда	Тавда	81000
12415	Тавда	Н. Тавда	86100
12417	Лозьва	Першино	6530
12422	Ивдель	Ивдель	2250
12430	Сосьва	Денежкино	4390
12434	Сосьва	Сосьва	22100
12435	Сосьва	Гари	23600
12476	Вагран	Североуральск	1430
12498	Турья	Карпинск	480
12511	Сотрина	Сотрино	403
12517	Лобва	Лобва	2940
12528	Карабашка	Карабашка	648
12554	Тобол	Кокино	172000
12606	Бочанка	Заводопетровское	678
12611	Сосьва	Морозково	11500
12613	Караталаят	Карталы	659
12614	Кунара	Быкова	380
12615	Исеть	Долматово	13100
12617	Н. Алабуга	Плотниково	456
12620	Суерь	Волосниково	10300
12631	Уй	Усть-Уйское	34400
12632	Ирбит	Зайково	3320
12646	Каква	Каквинское	716
12651	Пышма	Талица	11200
12652	Нейва	Кировское	5240

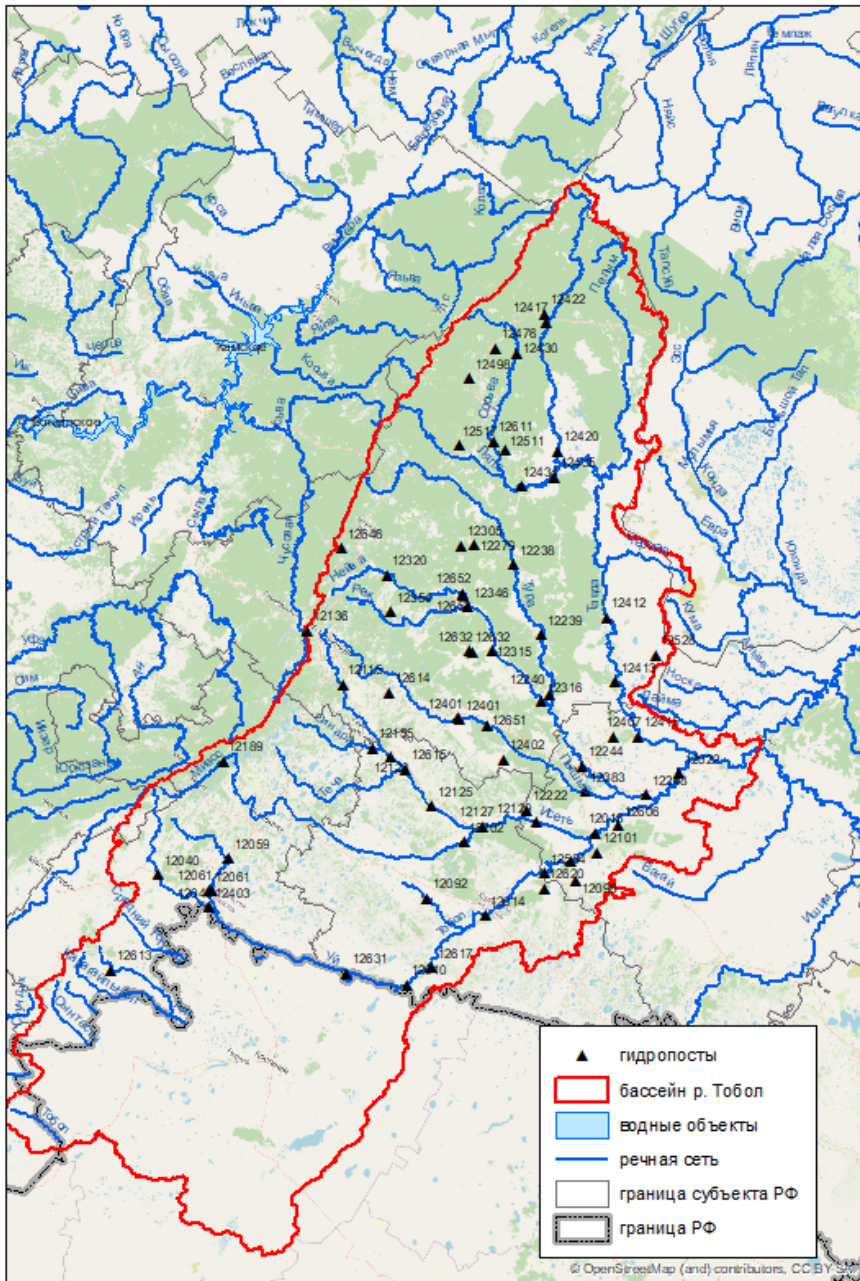


Рис. 2.10. Расположение рассматриваемых гидрологических постов в бассейне р. Тобол.

Следует иметь в виду, что фактическая заблаговременность прогнозов несколько меньше значений $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток на промежутки времени между измерением уровня воды в 20.00 суток t , необходимым для определения величины $H(t)$, и получением прогноза $\tilde{H}(t + \Delta t)$.

В качестве примера в табл. 2.7 приведены параметры формул (2.5) и (2.6) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда у города Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

Значения коэффициентов $a_1(\Delta t)$, $a_3(\Delta t)$ и $a_4(\Delta t)$ оказались нулевыми вследствие их округления.

Таблица 2.7

Параметры формул (2.5) и (2.6) получения прогноза среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$	min H	max H
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,010	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,450	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,870	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,450	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [13].

1. Из 11-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 10 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (2.5) и (2.6) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.

4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) 366 суток.

5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.

6. После повторения описанной процедуры для всех 11 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

В табл. 2.8 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

- S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, см;
- σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, см;
- S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;
- P – оправдываемость прогнозов, %.

Таблица 2.8

Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}	P
1	2,8	7,8	0,36	96 %
2	6,1	15,4	0,40	95 %
3	10,0	22,8	0,44	94 %
4	14,0	30,1	0,47	93 %
5	18,4	37,3	0,49	91 %
6	22,9	44,3	0,52	90 %
7	27,5	51,1	0,54	88 %
8	32,4	57,9	0,56	86 %
9	37,4	64,4	0,58	85 %
10	42,6	70,9	0,60	85 %

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для данного речного створа все краткосрочные прогнозы с заблаговременностью 1–5 суток относятся к категории хороших, а среднесрочные прогнозы с заблаговременностью 6–10 суток относятся к категории удовлетворительных.

На рис. 2.11 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 7$ суток среднесуточных уровней воды в 2018 году.

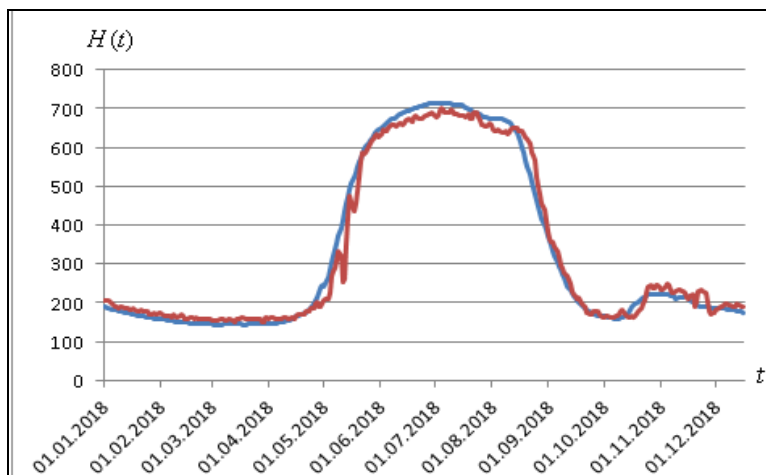


Рис. 2.11. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток (красным) ход среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом уровней воды перед датой составления прогноза.

Анализ результатов

Для всех случаев, когда соотношение S/σ_{Δ} было меньше 0,80, оправдываемость таких прогнозов P превышала 60 %. Следовательно, соотношение S/σ_{Δ} в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов уровней воды. В табл. 2.9 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

В табл. 2.10 для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов M , для которых получены удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с показателями $S/\sigma_{\Delta} < 0,80$ и $P > 60$ %.

Таким образом, удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1 сутки получаются для 65,6 %, а с максимальной заблаговременностью 10 суток – для 23,4 % рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографа оказался неприменимым для рек с малой площадью водосбора, сток которых быстро реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков

[74, 92, 122, 124]. Для рек с большой площадью водосбора ход среднесуточных уровней имеет плавный характер, как на рис. 2.11, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью.

Таблица 2.9

Значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Створ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12010	0,63	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76
12014	0,62	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
12017	0,49	0,58	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86
12018	0,47	0,54	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
12022	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60
12040	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
12043	0,83	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12059	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83
12061	0,91	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
12092	0,81	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
12098	0,62	0,74	0,82	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
12101	0,84	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
12115	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12123	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92
12125	0,74	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90
12127	0,53	0,60	0,65	0,70	0,74	0,76	0,78	0,80	0,81	0,82
12129	0,57	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81
12136	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
12155	0,80	0,85	0,91	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12189	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12202	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88
12222	0,74	0,87	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
12238	0,63	0,72	0,77	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
12239	0,35	0,44	0,52	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76
12240	0,30	0,37	0,44	0,50	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,67
12244	0,37	0,42	0,46	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
12248	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63
12279	0,81	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
12305	0,71	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
12315	0,61	0,70	0,77	0,81	0,84	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12316	0,43	0,48	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,68	0,70	0,71
12320	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12346	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
12354	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90
12383	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61

Створ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12401	0,74	0,85	0,90	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12402	0,71	0,78	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
12407	0,75	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87
12412	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,66
12413	0,36	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
12415	0,42	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62
12417	0,73	0,84	0,89	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12422	0,86	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91
12430	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87
12434	0,35	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,74	0,77	0,80	0,81
12435	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
12476	0,90	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
12498	0,91	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
12511	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
12517	0,79	0,87	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12528	0,84	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
12554	0,55	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77
12606	0,68	0,78	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93
12611	0,50	0,61	0,69	0,75	0,79	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
12613	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
12614	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90
12615	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
12617	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91
12620	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86
12631	0,67	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
12632	0,72	0,81	0,87	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12646	0,91	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12651	0,72	0,76	0,80	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12652	0,95	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91

Таблица 2.10

**Число речных створов с удовлетворительными прогнозами
среднесуточных уровней воды различной заблаговременности**

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	42	31	25	21	21	19	18	17	17	15

На рис. 2.12 представлена зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов Δ_{\max} от логарифма площади водосбора $\ln A$. Равенство $\max(\Delta t)$ нулю означает, что для данного

речного створа прогнозы уровней воды оказались неудовлетворительными даже при заблаговременности 1 сутки.

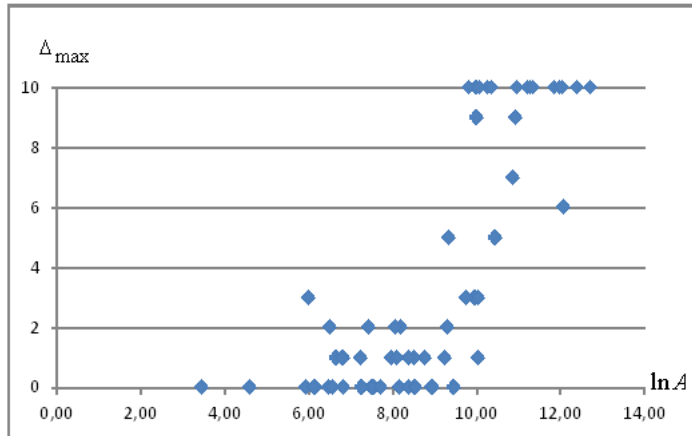


Рис. 2.12. Зависимость показателя Δ_{\max} от $\ln A$ для бассейна реки Тобол.

Данная зависимость показывает, что с ростом площади водосбора максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов в целом возрастает. Как правило, метод экстраполяции гидрографа не позволяет удовлетворительно прогнозировать среднесуточные уровни воды в речных створах с площадью водосбора менее 5 000 км². Для речных створов бассейна Тобола с площадью водосбора более 50 000 км² данный метод дает удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью не менее 5 суток.

2.4. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование стока рек бассейна Дона и притока воды в Цимлянское водохранилище

Постановка задачи и объект исследования

Основанная на методе экстраполяции гидрографа схема получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды получена для 18 створов, расположенных на реке Дон и его притоках различных порядков.

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 2.13.

В табл. 2.11 для этих створов помешены номера гидрологических постов, значения площади водосбора A км², длины реки L км и среднего уклона реки I %.

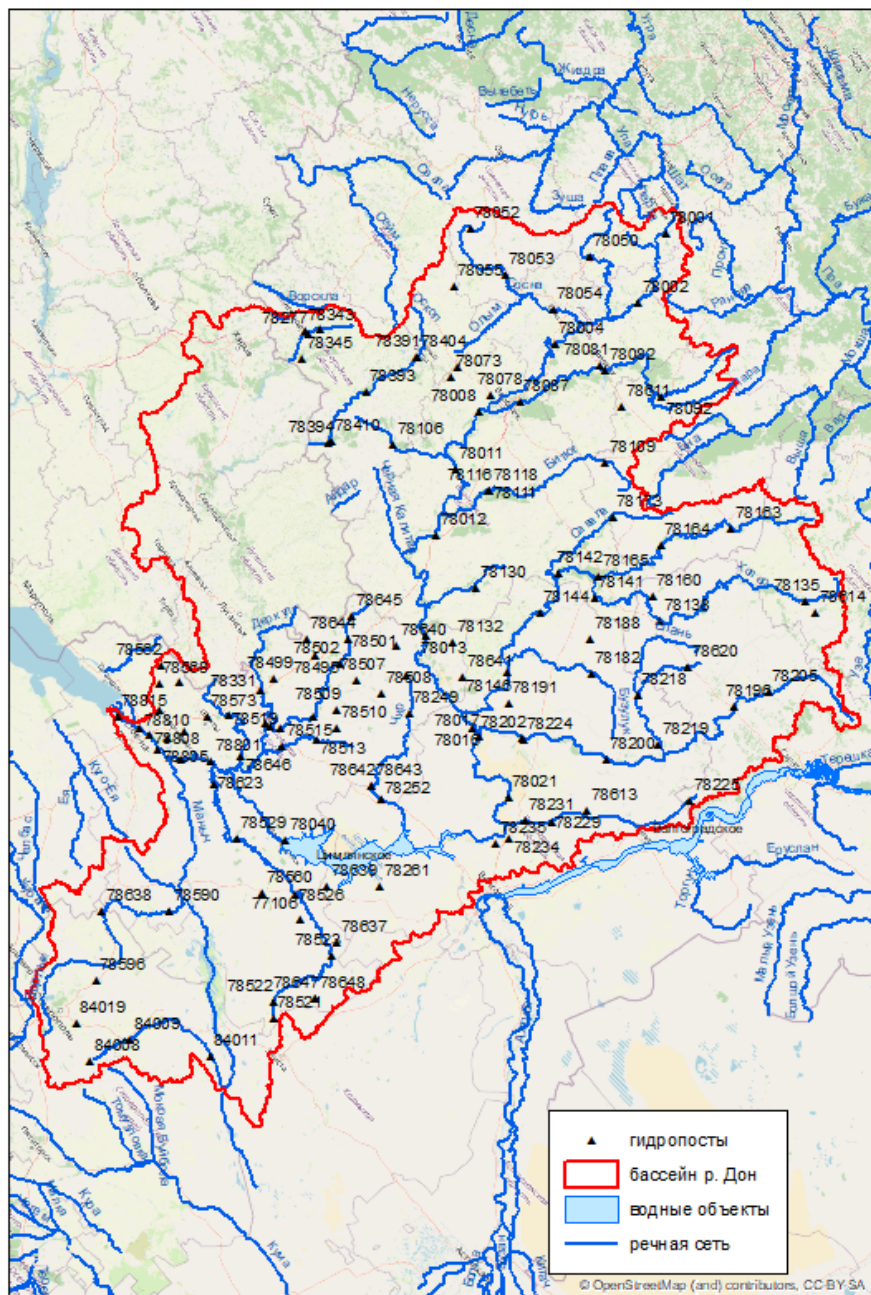


Рис. 2.13. Расположение рассматриваемых гидрологических постов в бассейне реки Дон.

Таблица 2.11

Основные характеристики исследуемых водосборов бассейна Дона

Индекс	Река	Пост	A км ²	L км	I ‰
78004	Дон	г. Задонск	31100	302	0,05
78011	Дон	г. Лиски	69500	588	0,08
78016	Дон	х. Хованский	169000	1066	0,16
78017	Дон	г. Серафимович	204000	1086	0,17
78021	Дон	ст. Новогригорьевская	208000	1212	0,22
78054	Сосна	г. Елец	16300	259	0,24
78082	Воронеж	г. Липецк 2	15300	156	0,41
78087	Воронеж	с. Чертовицкое	21000	301	2,07
78111	Битюг	г. Бобров	7340	290	0,29
78138	Хопер	г. Балашов	14300	384	0,13
78141	Хопер	г. Поворино	19100	542	0,21
78142	Хопер	г. Новохоперск	34800	656	0,32
78146	Хопер	х. Барминский	57300	847	0,90
78164	Ворона	г. Уварово	9890	319	0,56
78202	Медведица	ст. Арчединская	33700	679	0,18
78334	Сев. Донец	г. Белая Калитва	80900	934	1,81
78504	Калитва	х. Погорелое	10500	288	0,28
78623	Сал	х. Балабинка	21000	730	3,48

Решение поставленной задачи основано на данных ежедневных гидрологических наблюдений в указанных речных створах в течение периода с 2010 по 2020 год. С одной стороны, данный период представляется достаточно продолжительным, так как он позволяет использовать ряд из 2922 ежедневных значений среднесуточных расходов и уровней воды для разработки методик их прогнозирования в каждом речном створе. С другой стороны, данный период можно считать однородным по условиям формирования речного стока, включая климат и характер антропогенной нагрузки на территорию бассейна Дона [8, 31, 41, 42, 45, 50].

Прогнозирование среднесуточных расходов воды

При получении прогноза среднесуточных расходов воды используются формулы (2.3) и (2.4) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_5(\Delta t)$ и

$b(\Delta t)$ формулы (2.3) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020. С целью определения входящих в формулу (2.4) значений $\min Q$ и $\max Q$ для каждого створа анализировались ряды годовых минимумов и годовых максимумов среднесуточных расходов воды за период с 1985 по 2018 год с использованием методов математической статистики, изложенных в [89]. После успешной проверки статистической однородности и отсутствия автокорреляции для каждого ряда были получены оценки параметров трехпараметрического гамма-распределения.

Допустимый для прогноза минимум $\min Q$ определялся как значение годового минимума среднесуточного расхода воды $Q_{\min}(99\%)$, соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону.

Допустимый для прогноза максимум расхода воды $\max Q$ определялся как значение годового максимума среднесуточного расхода воды $Q_{\max}(1\%)$, соответствующее обеспеченности 1 % и округленное до целой величины в большую сторону.

Подобная оценка величин $\min Q$ и $\max Q$ гарантирует, что в течение 10 последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10 %.

В табл. 2.12 для минимальных и максимальных расходов воды помещены оценки среднего значения \bar{Q} , коэффициента вариации Cv , отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации Cs/Cv , а также округленного минимального расхода $Q_{\min}(99\%)$ обеспеченности 99 % и округленного максимального расхода $Q_{\max}(1\%)$ обеспеченности 1 %.

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Анализ этих показателей приводит к следующим выводам.

1. Оправдываемость P всех методик достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и варьирует в пределах от 83 до 98 %.

2. Максимальная заблаговременность удовлетворительных по показателям S/σ_{Δ} прогнозов варьирует от 2 до 10 суток и в среднем превышает 6 суток.

В табл. 2.13 помещены значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов среднесуточных расходов воды во всех рассматриваемых речных створах.

Таблица 2.12

**Статистические оценки рядов минимальных и максимальных
расходов воды за период с 1985 по 2018 год**

Река	Пост	\bar{Q}_{\min}	Cv_{\min}	$\left(\frac{Cs}{Cv}\right)_{\min}$	Q_{\min} (99%)	\bar{Q}_{\max}	Cv_{\max}	$\left(\frac{Cs}{Cv}\right)_{\max}$	Q_{\max} (1%)
Дон	г. Задонск	67,1	0,23	4	39	1123	0,69	1	3234
Дон	г. Лиски	115	0,18	2,5	70	1263	0,73	2	4420
Дон	х. Хованский	187	0,27	3,5	93	1123	0,55	3	3560
Дон	г. Серафимович	228	0,21	4,5	148	1745	0,57	3,5	5531
Дон	ст. Новогригорьевская	231	0,24	3,5	133	1919	0,48	2,5	5110
Сосна	г. Елец	27,0	0,34	1	6	704	0,68	1	2027
Воронеж	г. Липецк 2	18,1	0,26	1	8	302	0,64	1,5	932
Воронеж	с. Чертовицкое	22,2	0,31	1	9	326	0,67	1	939
Битюг	г. Бобров	4,84	0,32	3	2	134	0,78	1,5	460
Хопер	г. Балашов	15,8	0,24	1	6	364	0,55	2,5	1085
Хопер	г. Поворино	24,9	0,27	2,5	12	429	0,62	4	1450
Хопер	г. Новохоперск	39,2	0,28	2	17	629	0,63	2,5	2200
Хопер	х. Барминский	52,6	0,24	1,5	27	524	0,38	1	1064
Ворона	г. Уварово	13,3	0,42	6	5	252	0,64	2,5	803
Медведица	ст. Арчединская	17,2	0,24	1,5	8	411	0,84	4,5	1747
Сев. Донец	г. Белая Калитва	47,4	0,33	4,5	23	472	0,57	2	1364
Калитва	х. Погорелое	2,68	0,42	2	1	139	0,88	1,5	529
Сал	х. Балабинка	5,26	0,24	1	2	43,0	0,93	2,5	200

Таблица 2.13

Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов расходов воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Река	Пост	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дон	г. Задонск	0,61	0,75	0,80	–	–	–	–	–	–	–
Дон	г. Лиски	0,53	0,65	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–	–
Дон	х. Хованский	0,74	0,72	0,74	0,77	0,79	0,80	–	–	–	–
Дон	г. Серафимович	0,58	0,58	0,59	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,72	0,74
Дон	ст. Новогригорьевская	0,72	0,74	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79
Сосна	г. Елец	0,66	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронеж	г. Липецк 2	0,58	0,67	0,73	0,79	0,80	–	–	–	–	–
Воронеж	с. Чертовицкое	0,47	0,61	0,67	0,74	0,78	0,80	–	–	–	–
Битюг	г. Бобров	0,46	0,55	0,64	0,74	0,79	–	–	–	–	–
Хопер	г. Балашов	0,49	0,55	0,62	0,67	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
Хопер	г. Поворино	0,43	0,48	0,56	0,63	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77	0,79
Хопер	г. Новохоперск	0,57	0,58	0,59	0,60	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
Хопер	х. Барминский	0,48	0,55	0,61	0,67	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,80
Ворона	г. Уварово	0,38	0,51	0,60	0,66	0,71	0,74	0,76	0,79	–	–
Медведица	ст. Арчединская	0,53	0,61	0,67	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–
Сев. Донец	г. Белая Калитва	0,75	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
Калитва	х. Погорелое	0,61	0,68	0,74	0,78	–	–	–	–	–	–
Сал	х. Балабинка	0,46	0,55	0,64	0,71	0,76	0,79	0,80	–	–	–

На рис. 2.14 для этого створа р. Северский Донец – г. Белая Калитва приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток среднесуточных расходов воды в 2018 году.

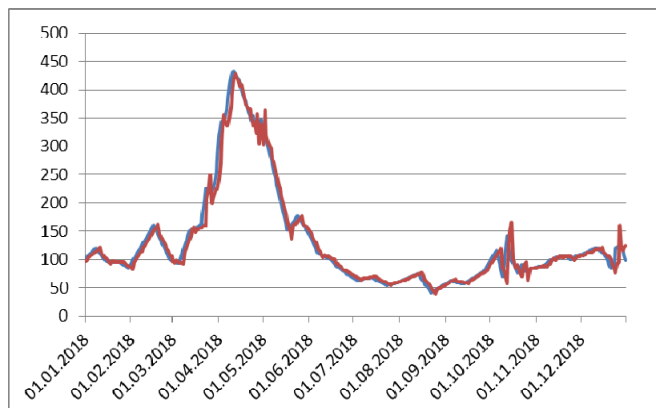


Рис. 2.14. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 3$ суток (красным) гидрографы в створе р. Северский Донец – г. Белая Калитва в 2018 году.

Прогнозирование среднесуточных уровней воды

Связь между расходами и уровнями воды может иметь неоднозначный характер благодаря изменениям формы русла и состояния водной растительности, наличию или отсутствию ледовых явлений и смене фаз водного режима [51, 59, 123]. Это наглядно демонстрирует рис. 2.15, на котором представлено соотношение между среднесуточными расходами и уровнями воды в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская по данным за период с 2010 по 2020 год.

В связи с указанным обстоятельством методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды разработана на основе метода экстраполяции гидрографа в качестве самостоятельной.

При получении прогноза среднесуточных уровней воды используются формулы (2.5) и (2.6) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$, ..., $a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.5) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020.

Распределение вероятностей среднесуточных уровней воды отличается от трехпараметрического гамма-распределения. Для некоторых речных створов часто наблюдаются отрицательные значения уровней.

В связи с этим для каждого створа в качестве параметра $\min H$ формулы (2.6) принимался наименьший член ряда годовых минимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2018 год, что соответствует их обеспеченности 97 %. В качестве параметра $\max H$ формулы (2.6) принимался наибольший член ряда годовых максимумов среднесуточного уровня воды за период с 1985 по 2018 год, что соответствует их обеспеченности 3 %.

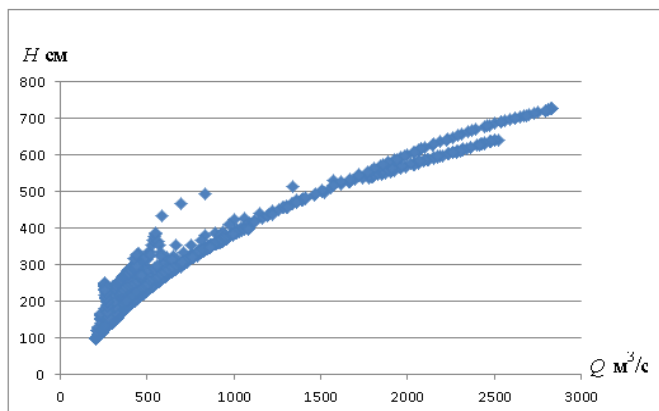


Рис. 2.15. Соотношение между среднесуточными расходами и уровнями воды в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская по данным за период с 2011 по 2018 год.

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Анализ этих показателей приводит к следующим выводам.

1. Оправдываемость P всех методик достаточно высокая, в целом снижается с ростом заблаговременности прогноза и варьирует в пределах от 75 до 98 %.

2. Максимальная заблаговременность удовлетворительных по показателям S/σ_{Δ} прогнозов варьирует от 1 до 10 суток и в среднем превышает 5 суток.

В табл. 2.14 помещены значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов среднесуточных уровней воды во всех рассматриваемых речных створах.

В целом, качество прогнозов уровней несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено тем, что благодаря более плавному ходу среднесуточных уровней в течение каждого года они прогнозируются лучше, чем расходы воды. Однако более плавный ход уровней приводит к малым значениям погрешности инерционного прогноза σ_{Δ} , в результате чего показатели S/σ_{Δ} становятся больше, а обеспеченности прогноза P – меньше.

Таблица 2.14

Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов уровней воды при заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Река	Пост	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дон	г. Задонск	0,59	0,71	0,76	–	–	–	–	–	–	–
Дон	г. Лиски	0,70	0,76	0,80	0,81	0,81	–	–	–	–	–
Дон	х. Хованский	0,73	0,72	0,74	0,75	0,76	0,77	–	–	–	–
Дон	г. Серафимович	0,75	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81
Дон	ст. Новогригорьевская	0,77	0,78	0,75	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,76
Сосна	г. Елец	0,60	0,70	–	–	–	–	–	–	–	–
Воронеж	г. Липецк 2	0,63	0,71	0,76	0,81	0,84	–	–	–	–	–
Воронеж	с. Чертовичское	0,73	0,76	0,79	0,82	0,84	0,85	–	–	–	–
Битюг	г. Бобров	0,57	0,69	0,75	0,80	0,84	–	–	–	–	–
Хопер	г. Балашов	0,41	0,52	0,62	0,69	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,81
Хопер	г. Поворино	0,50	0,57	0,59	0,60	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,68
Хопер	г. Новохоперск	0,50	0,53	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69
Хопер	х. Барминский	0,54	0,65	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,78	0,79
Ворона	г. Уварово	0,47	0,59	0,66	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	–	–
Медведица	ст. Арчединская	0,64	0,71	0,73	0,77	0,81	0,84	–	–	–	–
Сев. Донец	г. Белая Калитва	0,88	0,94	–	–	–	–	–	–	–	–
Калитва	х. Потгорелое	0,64	0,72	0,77	0,81	–	–	–	–	–	–
Сал	х. Балабинка	0,51	0,59	0,66	0,72	0,76	0,78	0,80	–	–	–

Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище

Для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище также был использован метод экстраполяции гидрографа. Использованы формулы (2.3) и (2.4) при $k = 5$. При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_5(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (2.3) определены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2020. С целью определения параметров $\min Q$ и $\max Q$ формулы (2.4) анализировались ряды годовых минимумов и годовых максимумов среднесуточного притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2020 год с использованием стандартных методов математической статистики [89]. После успешной проверки статистической однородности и отсутствия автокорреляции для каждого ряда были получены оценки параметров трехпараметрического гамма-распределения. Допустимый для прогноза минимум $\min Q$ определялся как значение среднесуточного расхода воды Q_{\min} (99%), соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99% и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум расхода воды $\max Q$ определялся как значение среднесуточного расхода воды Q_{\max} (1%), соответствующее обеспеченности 1% и округленное до целой величины в большую сторону [26].

Для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток параметры формул получения прогноза (2.3) и (2.4) помещены в табл. 2.15.

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная в предыдущем разделе процедура скользящего контроля. Эти оценки помещены в табл. 2.16.

Все значения S/σ_{Δ} не превышают 0,80, а оправдываемость P превышает 60%. Следовательно, согласно Наставлению по службе прогнозов [63] данная методика может быть признана удовлетворительной.

С точки зрения оптимизации работы Цимлянского гидроузла более важным является ежедневное прогнозирование притока воды за 5 и тем более за 10 суток с соответствующей заблаговременностью 5 и 10 суток [4].

Краткосрочный прогноз объема притока в водохранилище за пять суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением по формулам (2.3) и (2.4) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1), \dots, \tilde{Q}(t+5)$.

Таблица 2.15

Параметры формул (2.3) и (2.4) получения прогноза ежедневных расходов притока воды в Цимлянское водохранилище

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$\min Q$	$\max Q$
1	1,663	-0,425	-0,309	0,058	0,018	-0,007	1,28	200	2820
2	2,342	-1,013	-0,470	0,095	0,096	-0,057	3,47	200	2820
3	2,882	-1,464	-0,635	0,225	0,013	-0,035	6,51	200	2820
4	3,331	-1,855	-0,693	0,147	0,151	-0,103	10,32	200	2820
5	3,687	-2,096	-0,945	0,262	0,282	-0,221	14,86	200	2820
6	4,039	-2,492	-0,978	0,362	0,372	-0,345	20,01	200	2820
7	4,229	-2,666	-1,028	0,417	0,476	-0,481	25,80	200	2820
8	4,372	-2,793	-1,052	0,505	0,447	-0,545	31,90	200	2820
9	4,483	-2,871	-1,039	0,448	0,542	-0,641	38,34	200	2820
10	4,590	-2,899	-1,167	0,501	0,639	-0,757	45,08	200	2820

Таблица 2.16

Показатели качества прогнозов ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище

	$\Delta t=1$	$\Delta t=2$	$\Delta t=3$	$\Delta t=4$	$\Delta t=5$	$\Delta t=6$	$\Delta t=7$	$\Delta t=8$	$\Delta t=9$	$\Delta t=10$
S	18,6	38,3	70,7	97,3	115	143	167	192	215	236
S/σ_Δ	0,48	0,54	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75
P	91%	89%	86%	87%	86%	84%	85%	84%	83%	82%

С учетом числа секунд в сутки измеряемый в миллионах м^3 прогноз $\tilde{W}_5(t)$ объема притока воды в Цимлянское водохранилище за последующие 5 суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_5(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^5 \tilde{Q}(t+i). \quad (2.7)$$

Среднесрочный прогноз объема притока в водохранилище за 10 суток предлагается выпускать ежедневно одновременно с получением по формулам (2.3) и (2.4) прогнозов среднесуточных расходов притока $\tilde{Q}(t+1)$, ..., $\tilde{Q}(t+10)$. Изменяемый также в миллионах м^3 прогноз

$\tilde{W}_{10}(t)$ объема притока воды в Цимлянское водохранилище за следующие 10 суток после даты t его выпуска определяется формулой:

$$\tilde{W}_{10}(t) = 0,0864 \sum_{i=1}^{10} \tilde{Q}(t+i). \quad (2.8)$$

Для получения оценок качества прогнозов на независимом материале использована описанная выше процедура скользящего контроля [26]. Эти оценки помещены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

**Показатели качества прогнозов объемов притока
в Цимлянское водохранилище за пять и десять суток**

Интервал	S , млн м ³	σ_{Δ} , млн м ³	S/σ_{Δ}	P
5 суток	26,1	69,6	0,38	94%
10 суток	102	245	0,42	92%

Таким образом, предлагаемые методики прогнозирования объемов притока в Цимлянское водохранилище за пять и за десять суток могут быть отнесены к категории хороших.

Глава 3.

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ HBV-96 И СИСТЕМЫ COSMO-RU

3.1. Расчет среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96

Постановка задачи и исходная информация

В 2022 году в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды с использованием концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-Ru (см. главу 5).

В качестве первого приближения разработана использующая модель HBV-96 методика расчета среднесуточных расходов воды, в которой используются фактические значения метеорологических характеристик (осадков, приземной температуры воздуха), а не их прогнозы соответствующей заблаговременности, как это должно быть при прогнозировании речного стока.

В качестве исходной информации при разработке и верификации излагаемой методики расчета использованы данные ежедневных наблюдений за расходами воды, атмосферными осадками и приземной температурой воздуха на сети гидрологических постов и метеорологических станций в течение периода с 01.01.2010 по 31.12.2020.

Данные о среднесуточных расходах воды получены по результатам ежедневных наблюдений на 590 гидрологических постах, расположенных в замыкающих створах каждого речного бассейна. Расположение этих постов показано на рис. 3.1.

Площадь речных бассейнов варьирует от 1 км² до 2 850 000 км² (Обь) и в среднем равна 71652 км². Границы речных бассейнов были рассчитаны с использованием геоинформационного программного обеспечения и цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной на основе топографических карт масштаба 1:100 000.

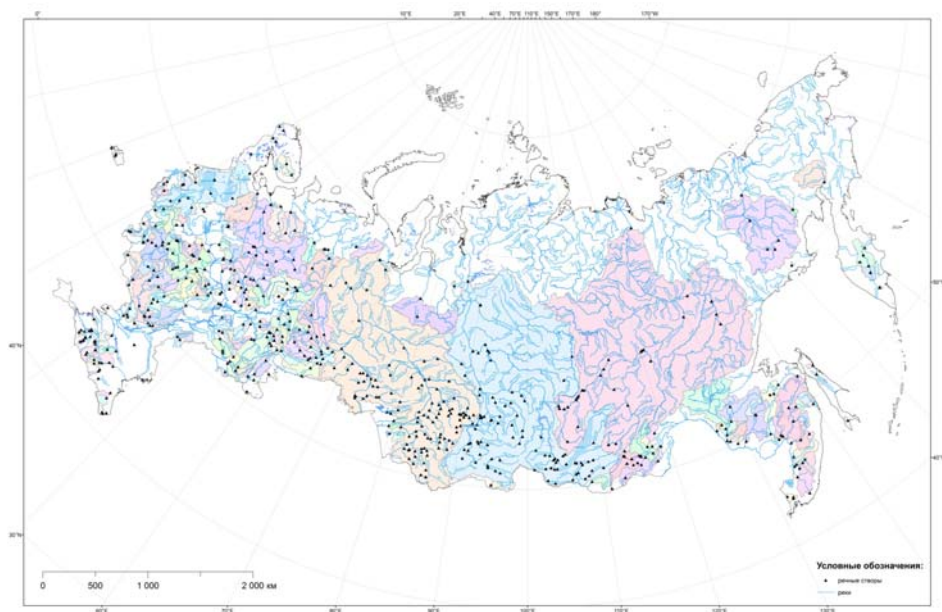


Рис. 3.1. Расположение использованных гидрологических постов.

Для каждого речного бассейна формировался архив данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в его пределах или в его окрестностях. При определении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха на основе срочных наблюдений на каждой метеорологической станции учитывался часовой пояс, в котором она находится. При получении осредненных по территории речного бассейна осадков и температуры воздуха учитывалось расположение относящихся к этому речному бассейну метеорологических станций. Высота местности не учитывалась, так как для предгорных и горных водосборов имелось не более одной метеостанции.

Модель формирования речного стока HBV-96

Концептуальная водно-балансовая модель формирования речного стока HBV-96 разработана в Гидрометеорологическом институте Швеции [95, 135]. Теоретические основы модели заложены С. Бергстрёмом в работе [94]. В настоящее время она используется в оперативной практике гидрологических прогнозов более чем в 40 странах мира с различными природными условиями [137]. В частности, модель способна описывать процессы формирования и таяния снежного покрова, поэтому она успешно применяется в расчетах и прогнозах расходов воды в странах с умеренным климатом [82, 109, 145].

В качестве входной информации модель использует осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков. На выходе получаются ежедневные значения среднесуточных расходов воды в замыкающем речном створе.

Модель состоит из блоков, описывающих основные процессы формирования речного стока: динамику снежного покрова; транспирацию и испарение с поверхности водосбора; динамику почвенной влаги; формирование поверхностного, почвенного и грунтового склонового стока; поступление стока с различных частей водосбора и трансформацию стока в русловой сети. Модель позволяет учитывать влияние озер и водохранилищ. Для горных водосборов расчет динамики снежного покрова и почвенной влаги производится для каждой высотной зоны [95].

В модели фигурируют 12 параметров, подлежащих оптимизации по данным гидрометеорологических наблюдений.

Блок, описывающий динамику снежного покрова, в качестве параметров содержит:

- температуру, при которой осадки выпадают в виде снега;
- коэффициент стаивания;
- водоудерживающую способность снега;
- температуру, при которой удерживаемая снегом вода замерзает.

Блок, описывающий испарение и транспирацию в качестве параметра, содержит их предельное значение в долях от испаряемости в зависимости от времени года, температуры воздуха, высоты местности, наличия или отсутствия осадков.

Блок, описывающий динамику почвенной влаги, в качестве параметров содержит:

- максимальную влагоемкость почвы;
- максимальное значение инфильтрации;
- параметр пространственного распределения емкости верхнего и нижнего слоя почвы;
- коэффициент истощения верхнего и нижнего слоя почвы.

Блок, определяющий расход воды в замыкающем створе, содержит параметр функции бассейновой трансформации [95, 135].

Оптимизация параметров модели

Для нахождения оптимальных значений параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2016. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались

многоводные, маловодные и средние по водности годы. Оптимизация параметров модели HBV-96 выполнена с помощью алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборки) значений параметров SCE-UA [110]. Алгоритм включает следующие этапы.

1. Случайным образом генерируется выборка значений векторов, образованных оцениваемыми параметрами.

2. Производится ранжирование членов выборки по значению целевой функции, то есть суммы квадратов ошибок расчета.

3. Выполняется процедура разбиения выборки на ряд «комплексов» (перетасовка векторов) и последующая эволюция каждого из комплексов (изменение каждого из векторов по заданному алгоритму).

4. Производится обратное объединение измененных комплексов (после эволюции значений векторов) в единую выборку.

5. Повторяется процедура ранжирования на основе оценки значений целевой функции, перетасовка, разбиение на комплексы, эволюция комплексов.

Цикл процедур повторяется до тех пор, пока не выполняется изначально заданное условие сходимости. Изначальная случайная перетасовка пространства параметров создает предпосылку для поиска глобального оптимума целевой функции без привязки к заранее заданным начальным значениям параметров [110].

Использовано программное обеспечение *PEST*, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [108]. Скорость выполнения оптимизации с помощью данного алгоритма и используемых программных средств составила от 20 до 30 минут при раз- мере обучающей выборки $N = 2557$.

Коррекция моделируемых расходов воды

В целях повышения точности модельных расчетов применен описанный в главе 1 метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и широко используемый в мировой практике гидрологических прогнозов [21, 79, 121, 137]. Идея метода состоит в том, что если к дате t получения расчетного значения $\hat{Q}(t)$ уже известные результаты расчета за предыдущие сутки демонстрируют завышение или, наоборот, занижение фактических значений среднесуточного расхода воды $Q(t)$, то расчет для этой даты целесообразно уменьшить или соответственно увеличить. Обоснованность такого приема возрастает, если ошибки предшествующих расчетов образуют серию отрицательных или положительных значений, что и было отмечено для подавляющего большинства рассматриваемых речных бассейнов.

Скорректированные расчетные значения среднесуточных расходов воды определяются формулой:

$$\tilde{Q}(t) = \hat{Q}(t) + \sum_{i=1}^k a_i [Q(t-i) - \hat{Q}(t-i)] + b. \quad (3.1)$$

Дополнительный свободный член b в формуле (3.1) обеспечивает отсутствие систематической ошибки расчета.

При любом заданном значении k оптимальные значения параметров a_1, \dots, a_k и b формулы (3.1) оценивались методом наименьших квадратов, который обеспечивает минимум суммы $\sum_{t=1}^N [Q(t) - \tilde{Q}(t)]^2$ квадратов ошибок расчета за весь предназначенный для калибровки период с 01.01.2010 по 31.12.2016 продолжительностью $N = 2557$ суток.

Оптимальное число k определялось с помощью критерия Акаике, в котором учитывается не только погрешность расчета для калибровочного периода, но и соотношение между числом $k+1$ оцениваемых параметров и его длиной N [87]. Сравнение полученных таким образом оптимальных значений k для всех 590 речных бассейнов позволило в целях упрощения методики расчета принять для них единое значение $k = 5$.

Использование концептуальной модели формирования речного стока НВВ-96 с последующей коррекцией модельных расчетов описанным выше способом составляют основу предлагаемой методики получения среднесуточных расходов воды.

Программное обеспечение методики

Реализация методики расчета среднесуточного расхода воды выполнена на языке программирования *Python* (версия 3.4) с привлечением программных модулей, таких как *Numpy*, *Pandas*, *Arcgisscripting*, *SciPy*, *Matplotlib*. Программное обеспечение включает в себя ряд программ, реализующих следующие расчетные этапы подготовки и информации и выполнения расчетов:

- подготовка исходных гидрометеорологических данных;
- модель формирования стока;
- оптимизация параметров модели;
- коррекция расчетов.

Программа подготовки исходных гидрометеорологических данных основана на использовании модулей и алгоритмов обработки пространственной информации, такой как расположение гидрологических постов и метеорологических станций, ЦМР и пространственной информации о часовых поясах.

Разработанная программа для каждого гидрологического поста из рассматриваемого списка осуществляла автоматизированное построение водосбора по данным ЦМР, а также определение метеорологических

станций, находящихся в пределах каждого водосбора. С использованием электронного слоя часовых поясов производилось назначение часового пояса для каждой метеорологической станции, пересчет отметок времени срочных наблюдений из Среднего гринвичского времени в местное время и расчет среднесуточных значений приземной температуры воздуха и слоя осадков за сутки.

Программа, реализующая модель формирования стока HBV-96, с использованием входного набора оптимальных параметров модели и констант водосбора для каждого расчетного шага времени по данным о приземной температуре воздуха и слое осадков вычисляет расход воды в замыкающем створе водосбора. Структурно программа состоит из подпрограммы запуска, регулирующей режим работы модели, и подпрограмм расчета, описывающих основные расчетные соотношения модели формирования стока HBV-96.

Программа оптимизации модели реализует алгоритм *SCE-UA*, рассмотренный выше, и осуществляет запуск концептуальной модели, пока не будут найдены оптимальные значения параметров, при которых достигается наилучшее значение критерия качества. В программе заложен алгоритм повторной оптимизации с измененными параметрами оптимизации в случае, если удовлетворительный результат не был достигнут. Данная программа была применена к 590 створам. Продолжительность работы программы автоматизированной оптимизации параметров модели для рассматриваемых водосборов составила около 3 недель с использованием настольного персонального компьютера.

Программа коррекции расчетов реализует алгоритм коррекции на основе модели авторегрессии ошибок расчета. Программа минимизирует параметры модели коррекции методом наименьших квадратов с использованием выходных расчетных данных модели и наблюдаемых расходов воды.

В целях автоматизации процедуры использования и верификации методики расчета среднесуточных расходов воды для 590 речных бассейнов на языке *Python* разработана компьютерная программа, которая включает этапы: считывание и обработку данных, которые могут храниться в одном или нескольких файлах; оценку показателей качества получаемых расчетов; создание для каждого речного бассейна отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения расчета, показатели его качества и иллюстрирующие работу алгоритма графики; создание сводной таблицы с результатами расчетов.

Верификация расчетов

Для проверки методики на независимом материале использованы данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 продолжительностью 1461 суток.

Расхождение между фактическими значениями расходов воды $Q(t)$ и их расчетными оценками $\tilde{Q}(t)$ характеризуется рассмотренным в главе 1 показателем эффективности Наша – Сатклиффа [142].

На первом этапе анализировались ошибки расчета среднесуточных расходов воды с помощью модели HBV-96 непосредственно, без их корректировки. Результаты этого анализа показали, что для многих речных бассейнов даже такой упрощенный вариант методики позволяет давать неплохие результаты. Показатель NSE варьирует от 0,05 до 0,93 и в среднем равен 0,68. Хорошие результаты с соотношением $NSE \geq 0,80$ были получены для 151 речных бассейнов (26 %). Удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 \leq NSE < 0,80$ были получены для 362 речных бассейнов (61 %). Неудовлетворительные результаты с соотношением $NSE < 0,50$ были получены для 77 речных бассейнов (13 %).

В тоже время для большинства речных бассейнов отмечены заметные систематические ошибки расчета и наличие статистически достоверной автокорреляции в рядах ежедневных ошибок расчета, что выражается в образовании серий их положительных или отрицательных значений. Данное обстоятельство свидетельствует о целесообразности использования описанного выше метода коррекции моделируемых значений расходов воды.

На втором этапе анализировались ошибки расчета среднесуточных расходов воды по полноценному варианту методики с использованием модели HBV-96 с последующей коррекцией модельных расчетов. Результаты этого анализа практически для всех речных бассейнов показали отсутствие систематических ошибок расчета и статистически достоверной автокорреляции в рядах ежедневных ошибок расчета. Показатель NSE варьирует от 0,01 до 1,00 и в среднем равен 0,95. Хорошие результаты с соотношением $NSE \geq 0,80$ были получены для 557 речных бассейнов (94 %). Удовлетворительные результаты с соотношением $0,50 \leq NSE < 0,80$ были получены для 29 речных бассейнов (5 %). Неудовлетворительные результаты с соотношением $NSE < 0,50$ были получены для 4 речных бассейнов (1 %).

Достигаемое за счет коррекции уточнение характеризуется отношением среднеквадратической погрешности расчетов до и после ее использования. Для различных речных бассейнов это отношение варьирует от 1,02 до 38,16 и в среднем равно 5,80.

Таким образом, коррекция модельных расчетов является важным элементом предлагаемой методики, так как позволяет повышать их точность в среднем в 5,8 раза.

На рис. 3.2 приведены совмещенные графики хода фактических и рассчитанных среднесуточных расходов воды для шести рек с

различным типом водного режима. Гидрографы приведены для 2017 года, одного из трех лет, использованных для проверки методики на независимом материале.

Приведенные на рис. 3.2 графики демонстрируют высокое качество расчетов среднесуточных расходов воды по предлагаемой методике – фактические и рассчитанные гидрографы практически совпадают.

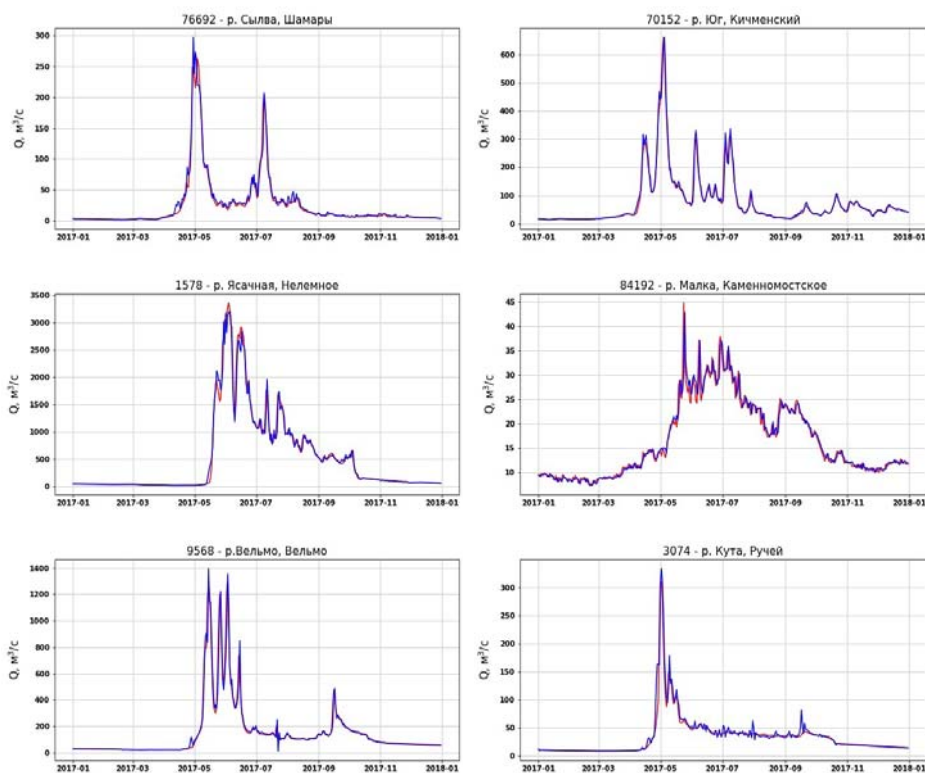


Рис. 3.2. Фактические (синим) и рассчитанные (красным) гидрографы 2017 года.

В табл. 3.1 приведены характеристики рассматриваемых рек: индекс гидрологического поста; название реки и пункта наблюдений; регион расположения водосбора реки; площадь водосбора; показатель эффективности Нэша – Саттклиффа до коррекции NSE и после коррекции NSE_C . Данные табл. 3.1 показывают, что для рек, расположенных в различных регионах России, коррекция расчетов приводит к существенному повышению их точности.

Таблица 3.1

Характеристики рассматриваемых рек

Индекс	Река	Пункт	Регион	Площадь км ²	<i>NSE</i>	<i>NSE_C</i>
76692	Сылва	с. Шамары	бассейн Камы	2140	0,865	0,980
1578	Ясачная	с. Нелемное	бассейн Колымы	32000	0,779	0,976
9568	Вельмо	с. Вельмо	бассейн Енисея	11800	0,723	0,973
70152	Юг	г. Кичменский городок	бассейн Сев. Двины	8890	0,663	0,986
84192	Малка	с. Каменно- мостское	бассейн Терека	1540	0,731	0,965
3074	Кута	п. Ручей	бассейн Лены	11200	0,688	0,967

В целом, полученные результаты дают основание для разработки автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов стока рек России на основе модели стока HBV-96.

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза используется разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru [32]. В связи с этим в следующем разделе оцениваются возможности использования этой системы при краткосрочном прогнозировании стока рек России.

3.2. Возможности использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России

Постановка задачи

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза предлагается использовать разработанную в ФГБУ «Гидрометцентр России» и хорошо себя зарекомендовавшую оперативную систему регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru [32, 76, 149].

С учетом максимальной заблаговременности метеорологических прогнозов прогноз среднесуточных расходов воды на реках России может выпускаться с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток. Качество этих

прогнозов определяется, с одной стороны, возможностями модели HBV-96 и успешностью калибровки ее параметров, а с другой стороны – возможностями использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России. Эти возможности определяются качеством получаемых с ее помощью прогнозов осредненных по территории тех же речных бассейнов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

Краткосрочные прогнозы речного стока с заблаговременностью до 5–6 суток могут выпускаться каждые 6 или 12 часов, но чаще всего они выпускаются один раз в сутки в 19.00 по местному времени [79, 137]. Шаг во времени, с которым выпускается прогноз, не имеет принципиального значения, поэтому во избежание неоправданных сложностей, учитывая существующую практику гидрологического прогнозирования, рассматривается наиболее типичный случай выпуска прогноза один раз в сутки.

С помощью моделей формирования речного стока прогнозируется расход воды Q м³/с в заданном речном створе, а прогноз уровня воды H см определяется по его зависимости от расхода. Таким образом, при дате выпуска прогноза t и заблаговременности прогноза Δt суток прогнозируется среднесуточный расход воды $Q(t + \Delta t)$ для даты $t + \Delta t$.

Как уже отмечалось, в основе метода прогнозирования речного стока чаще всего используется одна из концептуальных моделей его формирования со сосредоточенными параметрами. В качестве входной информации такая модель использует осредненные по территории речного бассейна ежедневные значения метеорологических величин, состав которых может различаться, но среди которых практически всегда присутствуют суточный слой осадков P мм и среднесуточная температура приземного слоя воздуха T °С [56, 61, 92, 122]. В связи с этим без потери общности получаемых выводов в дальнейшем рассматриваются только эти две метеорологические величины.

При получении прогноза расхода воды $Q(t + \Delta t)$ уже известными величинами являются слой осадков $P(t)$ и температура воздуха $T(t)$ для даты составления прогноза и значения этих величин $P(t-1)$, $T(t-1)$, $P(t-2)$, $T(t-2)$ за предыдущие сутки, число которых может быть велико.

Ожидаемый ход метеорологических элементов в течение периода заблаговременности от t до $t + \Delta t$ оценивается их прогнозами, получаемыми, например, с помощью системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru. В зависимости от величины Δt заблаговременность таких прогнозов может различаться следующим образом.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 1$ сутки необходимы прогнозы $\tilde{P}(t+1)$ и $\tilde{T}(t+1)$ с той же заблаговременностью.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 2$ суток необходимы прогнозы $\tilde{P}(t+1)$ и $\tilde{T}(t+1)$ с заблаговременностью 1 сутки и прогнозы $\tilde{P}(t+2)$ и $\tilde{T}(t+2)$ с заблаговременностью 2 суток.

При заблаговременности гидрологического прогноза $\Delta t = 3$ суток необходимы прогнозы $\tilde{P}(t+1)$ и $\tilde{T}(t+1)$ с заблаговременностью 1 сутки, прогнозы $\tilde{P}(t+2)$ и $\tilde{T}(t+2)$ с заблаговременностью 2 суток и прогнозы $\tilde{P}(t+3)$ и $\tilde{T}(t+3)$ с заблаговременностью 3 суток. И так далее. Таким образом, при заблаговременности прогноза речного стока Δt суток необходимо использовать Δt прогнозов, учитываемых моделью метеорологических элементов, с заблаговременностью от 1 до Δt суток.

Как и прогнозы гидрологических характеристик, метеорологические прогнозы неизбежно содержат случайные и систематические ошибки, полное устранение которых пока не представляется возможным [64, 114, 147, 151]. Эти ошибки могут вносить существенный вклад в погрешность прогноза речного стока. Такие ситуации возможны, если прогнозируемые метеорологические величины оказывают заметное влияние на прогноз речного стока, а содержащиеся в прогнозах этих элементов ошибки достаточно велики [13].

Влияние прогнозируемых метеорологических элементов на величину $Q(t + \Delta t)$ зависит от соотношения между временем реакции водосбора на погодные условия (выпадение осадков, таяние снега) и заблаговременностью прогноза Δt . Если это время меньше заблаговременности прогноза, что характерно для малых горных рек, влияние прогнозируемых метеорологических элементов на расход воды велико и вклад ошибок их прогноза значителен. Если время реакции водосбора намного больше заблаговременности гидрологического прогноза, что характерно для больших равнинных рек, ошибки прогнозирования метеорологических элементов практически не влияют на погрешность прогноза величины $Q(t + \Delta t)$.

Влияние ошибок метеорологических прогнозов на погрешность прогнозов речного стока дает основание для более подробного анализа качества прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха с помощью системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru. Использование этой системы для получения краткосрочных прогнозов стока рек Черноморского побережья Кавказа и бассейна Камы уже дало вполне удовлетворительные результаты [14, 82].

Система краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru

Оперативная система COSMO-Ru регионального краткосрочного численного прогноза погоды для территории России и прилегающих регионов разработана в ФГБУ «Гидрометцентр России» и функционирует

с 2009 года. В конфигурацию системы входит негидростатическая модель COSMO одноименного консорциума с шагом сетки 7 км [76, 77, 149].

Система полностью соответствует уровню ведущих метеослужб мира как по показателям успешности прогнозов, так и по примененным технологическим решениям. Оперативные испытания технологии COSMO-Ru проведены в ФГБУ «Гидрометцентр России» по существующим в настоящее время нормативам оценок прогнозов погоды и дали основание для ее внедрения в оперативную практику. Продукция COSMO-Ru четыре раза в сутки рассылается в подавляющее большинство прогностических центров Росгидромета, являясь одной из наиболее востребованных [75, 77].

Система COSMO-Ru позволяет получать прогнозы более 70 метеорологических полей, включающих поля накопленных крупномасштабных и конвективных осадков в виде дождя и снега и температуры воздуха на уровне 2 м от поверхности Земли. Прогнозы с заблаговременностью до 78 часов выпускаются четыре раза в сутки в 00, 06, 12 и 18 часов по Всемирному координированному времени [5, 32, 75].

В настоящей работе результаты прогнозирования некоторых метеорологических характеристик анализируются для 2081 метеорологических станций России, расположение которых показано на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Расположение используемых метеостанций.

Прогнозируемые с помощью оперативной системы COSMO-Ru поля осадков и приземной температуры воздуха интерполировались в точки

с координатами используемых метеорологических станций. При получении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха прогнозы соответствующих характеристик рассчитывались с учетом местного времени. В результате для каждой из рассматриваемых метеорологических станций России были получены ряды фактических значений суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и прогнозы этих величин с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток за период с 04.07.2013 по 31.12.2020.

Оценка качества метеорологических прогнозов

В современной практике метеорологических прогнозов используется определенный набор оценок их качества [62, 64, 72, 114, 151]. Эти оценки не совпадают с теми, которые применяются в гидрологических прогнозах [13, 63, 72, 122, 139]. С учетом того, что темой исследования является использование системы COSMO-Ru при прогнозировании речного стока, качество получаемых с помощью этой системы метеорологических прогнозов оценивается по критериям, принятым в гидрологии.

Для оценки качества получаемых метеорологических прогнозов суточного слоя осадков P мм и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха T °С их ошибки анализировались за период с 04.07.2013 по 31.12.2020. Длина анализируемых рядов ошибок прогноза равна $N = 2766$.

В табл. 3.2 помещены средние для всех 2081 метеорологических станций значения модуля смещения $|\bar{\delta}|$, частоты отрицательных значений смещения $P(\bar{\delta} < 0)$, среднеквадратической погрешности прогноза S и коэффициента корреляции R между фактическими значениями метеорологических элементов и их прогнозами. Указанные показатели приведены для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 3.2

Средние показатели качества прогнозов

	$\tilde{P}(1)$	$\tilde{P}(2)$	$\tilde{P}(3)$	$\tilde{T}(1)$	$\tilde{T}(2)$	$\tilde{T}(3)$
$ \bar{\delta} $	0,32	0,39	0,42	0,56	0,67	0,89
$P(\bar{\delta} < 0)$	78%	90%	91%	39%	31%	22%
S	3,88	4,35	4,77	1,99	2,28	2,65
R	0,594	0,504	0,403	0,987	0,984	0,979

Приведенные показатели позволяют сделать следующие выводы.

1. Все показатели качества прогнозов ухудшаются с ростом их заблаговременности.

2. Значения показателя $|\bar{\delta}|$ свидетельствуют о наличии систематической ошибки прогнозов, которая для температуры воздуха довольно велика и дает существенный вклад в среднеквадратическую погрешность ее прогноза.

3. Значения показателя $P(\bar{\delta} < 0)$ свидетельствуют о том, что в большинстве случаев прогнозы слоя осадков его завышают, а прогнозы температуры воздуха, наоборот, ее занижают.

4. Корреляция между фактическими значениями и их прогнозами для слоя осадков значительно ниже, чем для температуры воздуха. Для слоя осадков величина R заметно убывает с ростом заблаговременности прогноза, а для температуры воздуха изменение этой величины более сглаженное.

Учитывая важную роль показателя R , на рис. 3.4 представлена карта значений коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.



Рис. 3.4. Значения коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.

Карта показывает, что минимальные значения этого коэффициента характерны для горных регионов и для территорий с редкой сетью метеостанций. Распределение значений $R_p(2)$ и $R_p(3)$ дает приблизительно ту же картину, но при более низких значениях этих коэффициентов.

На рис. 3.5 представлена карта значений коэффициента корреляции $R_T(1)$ между температурой воздуха и ее прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.



Рис. 3.5. Значения коэффициента корреляции $R_T(1)$ между температурой воздуха и ее прогнозом с заблаговременностью 1 сутки.

Карта показывает, что высокие значения коэффициента корреляции $R_T(1)$ характерны для всей территории России, за исключением ее крайнего Северо-Востока. Распределение значений $R_T(2)$ и $R_T(3)$ приблизительно аналогично.

Коррекция метеорологических прогнозов

Отмеченные в выводах 1 и 2 недостатки устранены с помощью рассмотренного в главе 1 метода коррекции прогнозов, использующего уравнение линейной регрессии для перехода от первоначальных

прогнозов к их скорректированным значениям. Данный метод коррекции позволяет устранить систематические ошибки прогноза и страхует от неоправданно больших и малых значений прогнозов [21]. Для скорректированных прогнозов квадрат этой величины R^2 равен показателю Нэша – Сатклиффа [13].

Эффективность коррекции определяется отношением S/\hat{S} среднеквадратических погрешностей прогноза до и после ее применения. Это отношение всегда превосходит единицу и для рассматриваемых метеостанций достигает 10 для слоя осадков и 5,5 для температуры воздуха. В табл. 3.3 помещены средние для всех 2081 метеорологических станций значения S/\hat{S} и среднеквадратической погрешности скорректированного прогноза \hat{S} для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 3.3

Средние показатели качества скорректированных прогнозов

	$\tilde{P}(1)$	$\tilde{P}(2)$	$\tilde{P}(3)$	$\tilde{T}(1)$	$\tilde{T}(2)$	$\tilde{T}(3)$
S/\hat{S}	1,15	1,20	1,24	1,13	1,14	1,17
\hat{S}	3,48	3,75	3,98	1,77	2,02	2,29

Приведенные значения отношения S/\hat{S} показывают, что данный метод коррекции прогнозов повышает их точность в среднем на 20 % для слоя осадков и на 15 % для температуры воздуха.

На рис. 3.6 представлено распределение среднеквадратической погрешности $\hat{S}_p(1)$ скорректированного прогноза слоя осадков с заблаговременностью 1 сутки по территории России.

На рис. 3.7 представлено распределение среднеквадратической погрешности $\hat{S}_T(1)$ скорректированного прогноза температуры воздуха с заблаговременностью 1 сутки.

Пространственная изменчивость величин $\hat{S}_p(1)$ и $\hat{S}_T(1)$ носит довольно сложный характер, так как обусловлена распределением по территории России суточных слоев осадков и среднесуточных температур приземного слоя воздуха в различные периоды года и одновременно зависит от неравномерности расположения метеорологических станций.



Рис. 3.6. Значения среднеквадратической погрешности $\hat{S}_P(1)$ мм скорректированного прогноза слоя осадков с заблаговременностью 1 суток.

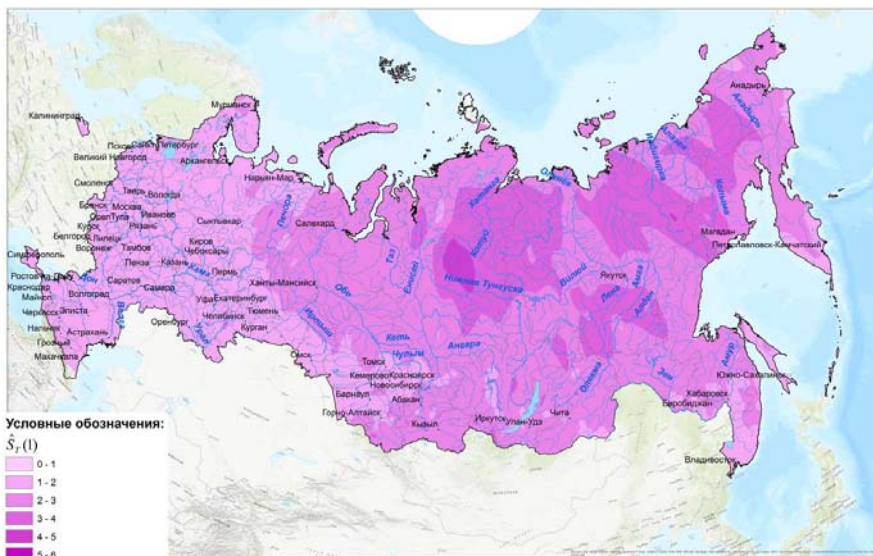


Рис. 3.7. Значения среднеквадратической погрешности $\hat{S}_T(1)$ °C скорректированного прогноза температуры воздуха с заблаговременностью 1 суток.

Осреднение метеорологических прогнозов

Выполненный анализ качества прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха для отдельных метеостанций представляет интерес прежде всего для случая, когда предсказание речного стока основано на использовании физико-математических моделей его формирования с распределенными параметрами, в которых учитывается изменение метеорологических величин по территории водосбора. Более широкое распространение в практике гидрологических прогнозов получили концептуальные модели с сосредоточенными или частично распределенными параметрами, в которых метеорологические величины усредняются по всей территории водосбора или по его отдельным частям [56, 61, 92, 122, 137].

Осреднение метеорологических величин по территории водосбора предполагает и осреднение их прогнозов. В результате происходит частичная взаимная компенсация содержащихся в этих прогнозах ошибок и, следовательно, повышение точности усредненных по территории водосбора прогнозов метеорологических величин [13, 147, 151].

Описанный эффект будет возрастать по мере увеличения числа расположенных на территории водосбора и соседних метеостанций и снижения пространственной корреляции между ошибками прогнозирования каждой из учитываемых в модели метеорологических величин. Таким образом, при прочих равных условиях качество осредненных по территории водосбора метеорологических прогнозов должно возрастать с увеличением его размеров и в частности его площади.

В настоящем разделе рассматриваются результаты осреднения полученных с помощью системы COSMO-Ru прогнозов суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха по территории 590 речных бассейнов, покрывающих практически всю территорию России. Их площадь варьирует от 14,8 км² до 2 950 000 км² и в среднем составляет 72 201 км². На рис. 3.8 представлен график зависимости коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки от логарифма площади водосбора $\ln A$. Зависимость статистически достоверна и характеризуется коэффициентом корреляции 0,44. Зависимости коэффициента корреляции между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 2 и 3 суток носят аналогичный характер.

Расположение точек на представленном графике показывает, что при больших площадях водосбора коэффициент $R_p(1)$ принимает достаточно высокие значения. В частности, среднее значение коэффициента $R_p(1)$ для водосборов площадью не менее 100 000 км² ($\ln A = 11,51$) равно 0,812.

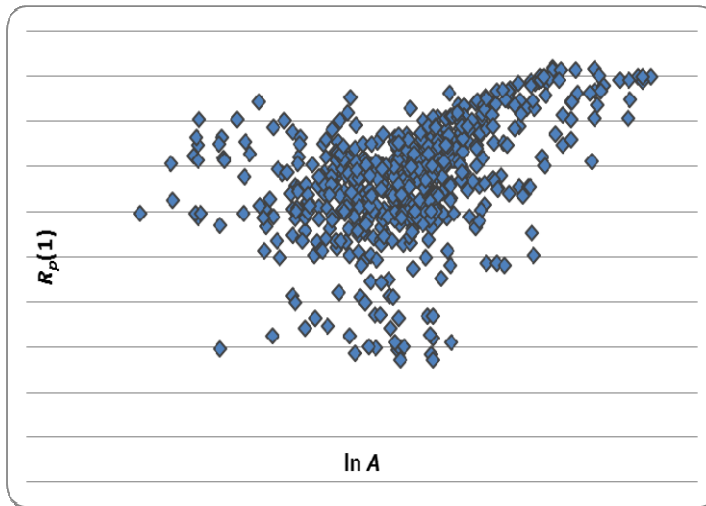


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента корреляции $R_p(1)$ между слоем осадков и его прогнозом с заблаговременностью 1 сутки от логарифма площади водосбора $\ln A$.

В связи с этим рассмотрены три варианта:

- вариант 1 с прогнозированием слоя осадков и температуры воздуха для каждой из 2081 метеорологических станций;
- вариант 2 с прогнозированием этих элементов, осредненных для каждого из 590 речных бассейнов;
- вариант 3 с прогнозированием этих элементов, осредненных для речных бассейнов с площадью не менее 100 000 км².

В табл. 3.4 для каждого варианта приведены средние значения коэффициентов корреляции R между фактическим слоем осадков и его прогнозом $\tilde{P}(\Delta t)$ и между фактической температурой воздуха и ее прогнозом $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 3.4

Средние значения коэффициентов корреляции R для каждого из трех вариантов

Вариант	$\tilde{P}(1)$	$\tilde{P}(2)$	$\tilde{P}(3)$	$\tilde{T}(1)$	$\tilde{T}(2)$	$\tilde{T}(3)$
1	0,594	0,504	0,403	0,987	0,984	0,979
2	0,666	0,582	0,484	0,990	0,987	0,983
3	0,812	0,741	0,662	0,993	0,991	0,988

Приведенные данные наглядно демонстрируют эффект повышения качества метеорологических прогнозов при переходе от точечных значений к осредненным по некоторой территории, и этот эффект возрастает по мере увеличения площади этой территории.

Для оценки качества прогнозов можно воспользоваться широко используемым в мировой практике гидрологического моделирования и прогнозирования показателем Нэша – Сатклиффа, для которого приняты критерии градации качества [13, 122, 139]. В данном случае этот показатель равен величине R^2 , поэтому принятая градация качества прогнозов выглядит следующим образом:

- качество прогнозов относится к категории хороших при условии $R \geq 0,80$;
- качество прогнозов относится к категории удовлетворительных при условии $0,4 \leq R < 0,80$;
- качество прогнозов относится к категории неудовлетворительных при условии $R < 0,4$.

Согласно данной градации, для речных бассейнов с площадью не менее 100 000 км² качество прогнозов суточного слоя осадков с заблаговременностью 1 сутки и прогнозов среднесуточной температуры воздуха с заблаговременностью 1, 2, 3 суток следует признать хорошим, а качество прогнозов суточного слоя осадков с заблаговременностью 2 и 3 суток следует признать удовлетворительным.

Для решения главной задачи – оценки возможностей использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России интерес представляет вариант 2. В целом для всех 590 речных бассейнов качество прогнозов суточного слоя осадков следует признать удовлетворительным, а качество прогнозов среднесуточной температуры воздуха следует признать хорошим.

Разумеется, речь идет о средних значениях используемого показателя качества прогнозов, и для различных речных бассейнов значения этого показателя варьируют в довольно широком диапазоне. Более детальную информацию дает табл. 3.5, в которой для прогнозов слоя осадков $\tilde{P}(\Delta t)$ и температуры воздуха $\tilde{T}(\Delta t)$ с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведена частота случаев, когда их качество относится к той или иной категории.

Приведенные данные показывают, что прогнозы суточного слоя осадков в основном относятся к категории удовлетворительных. Частота неудовлетворительных прогнозов возрастает с ростом их заблаговременности от 6 до 22 %. Что касается прогнозов среднесуточной температуры приземного слоя воздуха, то практически все они относятся к категории хороших.

Таблица 3.5

Частота различных категорий качества метеорологических прогнозов, %

Качество прогнозов	$\tilde{P}(1)$	$\tilde{P}(2)$	$\tilde{P}(3)$	$\tilde{T}(1)$	$\tilde{T}(2)$	$\tilde{T}(3)$
Хорошее	16	5	1	98	98	98
Удовлетворительное	78	85	77	0	0	0
Неудовлетворительное	6	9	22	2	2	2

Полученные результаты дают основание для положительной оценки возможностей использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России, методика которого излагается в следующем разделе.

3.3. Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-Ru

Постановка задачи и исходная информация

Используя концептуальную модель формирования речного стока HBV-96 и систему численного прогноза погоды COSMO-Ru методика краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды реализована для 546 речных бассейнов с различными условиями формирования стока.

В качестве исходной информации при разработке и верификации излагаемой методики расчета использованы данные ежедневных наблюдений за расходами воды, атмосферными осадками и приземной температурой воздуха на сети гидрологических постов и метеорологических станций в течение периода с 01.01.2010 по 31.12.2020.

Данные о среднесуточных расходах воды получены по результатам ежедневных наблюдений на 546 гидрологических постах, расположенных в замыкающих створах каждого бассейна. Площадь речных бассейнов варьирует от 1 км² до 2 850 000 км² (Обь) и в среднем равна 71 652 км². Границы речных бассейнов были рассчитаны с использованием геоинформационного программного обеспечения и цифровой модели рельефа, созданной на основе топографических карт масштаба 1:100 000.

Для каждого речного бассейна формировался архив данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в его пределах или в его окрестностях. При определении суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха на основе срочных наблюдений

на каждой метеорологической станции учитывался часовой пояс, в котором она находится. При получении осредненных по территории речного бассейна осадков и температуры воздуха учитывалось расположение относящихся к этому речному бассейну метеорологических станций.

Для оценки ожидаемого хода усваиваемых моделью метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза использована разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативная система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru, рассмотренная в предыдущем разделе. В целях повышения точности метеорологических прогнозов был применен метод линейной регрессии, который повышает их точность в среднем на 20 % для слоя осадков и на 15 % для температуры воздуха.

Прогнозируемые с помощью оперативной системы COSMO-Ru поля осадков и приземной температуры воздуха интерполировались в точки с координатами используемых метеорологических станций. Метеорологические прогнозы совмещались с данными наблюдений на метеостанциях путем билинейной интерполяции, после чего осуществлялся перевод данных в суточный интервал по времени и осреднение метеорологических наблюдений и прогнозов по территории каждого речного бассейна.

При заблаговременности прогноза расходов воды 1 суток используемая моделью HBV-96 входная информация содержит получаемые с помощью системы COSMO-Ru метеорологические прогнозы осредненных для каждого речного бассейна суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха с той же заблаговременностью. При заблаговременности гидрологического прогноза 2 суток используемая моделью входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1 и 2 суток. При заблаговременности гидрологического прогноза 3 суток входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

Известные к дате составления гидрологического прогноза осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков и полученные с помощью системы COSMO-Ru ожидаемые значения этих метеорологических элементов в течение периода его заблаговременности использовались в качестве входной информации для модели формирования речного стока HBV-96.

Для оценки параметров модели использована обучающая выборка, образованная данными ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2016, то есть за 2557 суток. Данный период можно считать репрезентативным, так как практически для всех рассматриваемых рек в течение этого периода наблюдались многоводные, маловодные и средние по водности годы.

Оптимальные значения параметров модели находились исходя из минимума суммы квадратов ошибок модельных расчетов, рассчитанной

по обучающей выборке. Оптимизация параметров модели *HBV-96* выполнена с помощью алгоритма перемешивания и эволюции комплексов (выборок) значений параметров *SCE-UA* [110]. Использовано программное обеспечение *PEST*, которое позволяет производить оптимизацию параметров широкого круга моделей, в том числе при помощи рассматриваемого алгоритма оптимизации [108].

В целях повышения точности прогнозов применен рассмотренный в настоящей главе метод коррекции, который учитывает автокорреляцию их ошибок и устраняет образование серий их положительных и отрицательных значений.

В целях автоматизации процедуры использования и верификации методики прогнозирования среднесуточных расходов воды для 546 речных бассейнов на языке *Python* разработана компьютерная программа, которая включает этапы: считывание и обработку данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах; оценку показателей качества получаемых расчетов; создание для каждого речного бассейна отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогнозов, показатели их качества и иллюстрирующие работу алгоритма графики; создание сводной таблицы с результатами прогнозов.

Верификация методики прогнозирования

Для проверки используемой методики прогнозирования на независимом материале в качестве контрольной выборки использованы данные за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 продолжительностью 1451 суток. Для каждого значения заблаговременности $\Delta t = 1, 2, 3$ суток получены оценки среднеквадратической погрешности прогнозов S , ее отношения к погрешности инерционного прогноза S/σ_{Δ} и показатель Нэша – Сатклиффа NSE .

В дополнение к получаемым с помощью данной методики прогнозам с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток был выполнен расчет среднесуточных расходов при использовании не прогнозируемых, а фактических значений среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков. Получение подобных модельных расчетов можно интерпретировать как прогноз нулевой заблаговременности ($\Delta t = 0$).

В табл. 3.6 для расчетов ($\Delta t = 0$) и для прогнозов с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведены осредненные по всем 546 речным бассейнам значения показателя NSE Нэша – Сатклиффа для вариантов без коррекции и с коррекцией выходов модели *HBV-96*.

Как и следовало ожидать, для обоих вариантов показатель NSE уменьшается с ростом заблаговременности прогнозов. При этом коррекция позволяет существенно повысить точность расчетов и прогнозов

среднесуточных расходов воды. В связи с этим вариант предлагаемой методики с коррекцией выходов модели HBV-96 рассматривается в качестве основного.

Таблица 3.6

Средние значения показателя NSE

	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Без коррекции	0,680	0,669	0,636	0,621
С коррекцией	0,955	0,891	0,877	0,873

Качество прогнозов по предлагаемой методике демонстрирует табл. 3.7, в которой приведено среднее значение отношения S/σ_{Δ} и относительное число речных бассейнов, для которых результаты прогнозов относятся к категории хороших ($S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$) и удовлетворительных ($0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$).

Таблица 3.7

Показатели качества прогнозов по предлагаемой методике

Показатель	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
S/σ_{Δ}	0,72	0,80	0,62
$S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$	12%	13%	28%
$0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$	50%	52%	60%

Помещенные в таблице данные свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет получать удовлетворительные и хорошие прогнозы среднесуточных расходов воды различной заблаговременности. Несмотря на снижение точности прогнозов с ростом их заблаговременности (см. табл. 3.6), за счет увеличения погрешности инерционного прогноза σ_{Δ} отношение S/σ_{Δ} не становится больше, а наоборот, уменьшается. Для 252 речных бассейнов, расположенных в различных регионах России, методика позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы при всех трех значениях заблаговременности $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Если использовать рассмотренный в разделе 1.4 более совершенный критерий проверки статистической достоверности неравенства S/σ_{Δ} , то число случаев хороших и удовлетворительных прогнозов значительно возрастает.

На рис. 3.9 приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью 2 суток расходов воды для шести рек с различным типом водного режима. Гидрографы приведены для 2017 года, одного из трех лет, использованных для проверки методики на независимом материале. Приведенные графики демонстрируют высокое качество прогнозов среднесуточных расходов воды по предлагаемой методике – фактические и рассчитанные гидрографы отличаются незначительно.

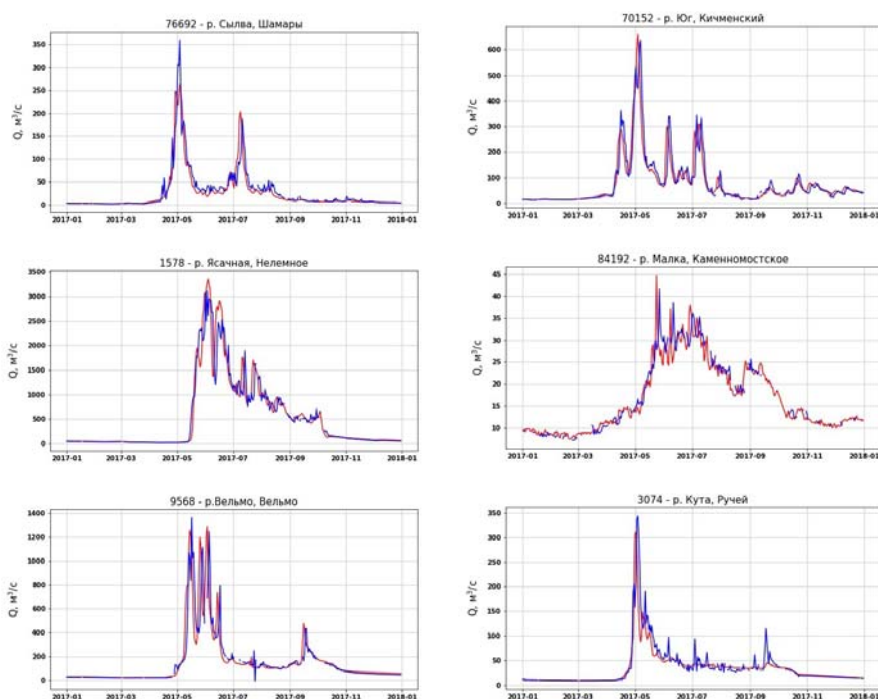


Рис. 3.9. Фактические (синим) и спрогнозированные (красным) с заблаговременностью 2 суток гидрографы 2017 года.

В табл. 3.8 приведены характеристики рассматриваемых речных бассейнов: индекс гидрологического поста; название реки и пункта наблюдений; регион расположения; площадь водосбора; показатель NSE и отношение S/σ_{Δ} для прогнозов с заблаговременностью 2 суток.

Полученные результаты позволяют использовать предлагаемую методику в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов стока рек России. Пример успешного применения данной методики для краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы приводится в следующем разделе.

Таблица 3.8

Характеристики рассматриваемых речных бассейнов

Индекс	Река	Пункт	Регион	Площадь км ²	<i>NSE</i>	S/σ_{Δ}
76692	Сылва	с. Шамары	бассейн Камы	2140	0,933	0,53
1578	Ясачная	с. Нелемное	бассейн Колымы	32000	0,918	0,60
9568	Вельмо	с. Вельмо	бассейн Енисея	11800	0,859	0,66
70152	Юг	г. Кичменский городок	бассейн Сев. Двины	8890	0,921	0,62
84192	Малка	с. Каменно- мостское	бассейн Терека	1540	0,894	0,64
3074	Кута	п. Ручей	бассейн Лены	11200	0,891	0,60

3.4. Краткосрочное прогнозирование стока рек бассейна Камы***Анализируемые речные бассейны***

Описанная в предыдущем разделе методика, использующая модель HBV-96 и систему COSMO-Ru, реализована для краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы [25]. Выбраны речные бассейны, находящиеся в пределах водосбора Камского водохранилища. Выпуск краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды в течение всего года, и в особенности в период формирования и прохождения весеннего половодья и дождевых паводков, необходим для предупреждения об опасных и нежелательных гидрологических явлениях в бассейне Камы и для научно обоснованного и эффективного управления работой Камского гидроузла. Расположение данных речных бассейнов показано на рис. 3.10.

В табл. 3.9 для всех 9 речных бассейнов приведены индекс гидрологического поста; название реки; пункт гидрологических наблюдений; площадь водосбора км².

В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы ежедневные данные о среднесуточных расходах воды в замыкающих створах, среднесуточной приземной температуре воздуха и суточной сумме осадков на сети гидрологических постов и метеорологических станций бассейна Камского водохранилища за 11 лет – с 2010 по 2020 год.

Таблица 3.9

Сведения об анализируемых речных бассейнах

Индекс	Река	Пункт	Площадь км ²
76075	Коса	с. Коса	6340
76159	Обва	с. Карагай	4210
76141	Иньва	д. Слудка	5210
76139	Иньва	г. Кудымкар	2050
76700	Кама	с. Лойно	11500
76112	Колва	г. Чердынь	13400
76176	Чусовая	пгт Староуткинск	5450
76701	Сылва	с. Сылвенск	17600
76692	Сылва	пгт. Шамары	2140

При получении гидрологических прогнозов для периода их заблаговременности использованы выходные данные метеорологической модели COSMO-Ru [75]. Метеорологические прогнозы совмещались с данными наблюдений на метеостанциях путем билинейной интерполяции, после чего осуществлялся перевод данных в суточный интервал по времени и осреднение метеорологических наблюдений и прогнозов по территории каждого речного бассейна.

Верификация прогнозов

Архив гидрометеорологической информации был разделен на обучающую и контрольную выборку. Обучающая выборка, образованная данными за семилетний период с 01.01.2010 по 31.12.2016, использована для построения методики. Контрольная выборка, образованная данными за период с 01.01.2017 по 31.12.2020, использована для оценки качества получаемых прогнозов на независимом материале.

Приведенные в табл. 3.10 значения важнейшего показателя S/σ_{Δ} показывают, что для всех рассматриваемых рек бассейна Камы качество краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды может быть отнесено к категории удовлетворительных ($0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$). Исключение составляют только прогнозы с заблаговременностью 2 и 3 суток в створе р. Сылва – г. Сылвенск.

Помимо показателей качества прогнозов S/σ_{Δ} и NSE анализировались совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток. Хорошее совпадение этих графиков для всех рассматриваемых

речных бассейнов демонстрирует достаточно высокое качество прогнозов. В качестве примера на рис. 3.11 приведены совмещенные графики хода фактических среднесуточных расходов воды в створе р. Сылта – пгт Самары в 2017 году и их прогнозов с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток.

Таблица 3.10

**Значения показателя S/σ_{Δ} для методики,
использующей модель HBV-96 и систему COSMO-Ru**

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,54	0,54	0,56
Обва	с. Карагай	0,65	0,67	0,65
Иньва	д. Слудка	0,57	0,65	0,64
Иньва	г. Кудымкар	0,61	0,67	0,65
Кама	с. Лойно	0,43	0,46	0,32
Колва	г. Чердынь	0,56	0,68	0,73
Чусовая	пгт Староуткинск	0,75	0,78	0,72
Сылва	с. Сылвенск	0,79	0,83	0,82
Сылва	пгт. Самары	0,63	0,72	0,74



Рис. 3.11. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью 2 суток (красным) гидрографы 2017 г. в створе р. Сылта – пгт Самары.

Влияние ошибок метеорологических прогнозов

Негативное влияние ошибок прогнозирования метеорологических элементов на качество прогнозов речного стока, основанных на различных моделях его формирования, является хорошо известным фактом [13, 61, 137]. С увеличением заблаговременности прогноза это влияние усиливается, так как неизбежные ошибки метеорологических прогнозов при этом возрастают и могут быть весьма значительными [147]. Увеличение погрешности прогнозов речного стока будет тем значительнее, чем больше погрешность прогноза учитываемых в модели метеорологических характеристик и выше их влияние на результаты гидрологического моделирования и последующего прогнозирования [13, 22].

Указанная закономерность справедлива и для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы, использующей модель формирования речного стока HBV-96, так как в этой методике для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются полученные с помощью метеорологической модели COSMO-Ru ожидаемые значения среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков, осредненные по территории водосбора. Эти значения содержат вероятные ошибки, которые не только увеличиваются с ростом заблаговременности прогноза, но и накапливаются. В частности, при заблаговременности прогноза расходов воды 2 суток используемая моделью входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1 и 2 суток, а при заблаговременности прогноза расходов воды 3 суток входная информация содержит метеорологические прогнозы с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток.

В целях оценки влияния ошибок метеорологических прогнозов для методики прогнозирования среднесуточных расходов воды на реках бассейна Камы на основе моделей HBV-96 и COSMO-Ru предлагается следующий прием.

В дополнение к получаемым с помощью данной методики прогнозам с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток был выполнен расчет среднесуточных расходов при использовании не прогнозируемых, а фактических значений среднесуточной приземной температуры и суточного слоя осадков. Получение подобных модельных расчетов можно интерпретировать как прогноз нулевой заблаговременности ($\Delta t = 0$). В табл. 3.11 для рассматриваемых речных бассейнов приведены значения показателя $NSE(\Delta t)$ Нэша – Саттклиффа для прогнозов среднесуточных расходов воды различной заблаговременности Δt , включая значение $\Delta t = 0$, что соответствует их расчету.

Ближкие к единице значения показателя $NSE(\Delta t)$ свидетельствуют о высоком качестве моделирования с помощью HBV-96 и коррекции

среднесуточных расходов воды. Снижение этих показателей с увеличением заблаговременности прогноза Δt отражает влияние ошибок метеорологического прогноза с помощью модели COSMO-Ru.

Таблица 3.11

Значения показателя $NSE(\Delta t)$ для прогнозов различной заблаговременности Δt

Река	Пункт	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,998	0,997	0,988	0,973
Обва	с. Карагай	0,993	0,991	0,976	0,937
Иньва	д. Слудка	0,994	0,994	0,973	0,941
Иньва	г. Кудымкар	0,984	0,983	0,928	0,873
Кама	с. Лойно	0,999	0,997	0,988	0,975
Колва	г. Чердынь	0,997	0,996	0,978	0,95
Чусовая	пгт Староуткинский	0,976	0,973	0,912	0,862
Сылва	с. Сылвенск	0,994	0,992	0,96	0,92
Сылва	пгт. Шамары	0,980	0,979	0,921	0,955

Ухудшение качества прогнозирования с ростом его заблаговременности характеризуется отношением $U(\Delta t)$ среднеквадратической погрешности $S(\Delta t)$ прогнозов среднесуточных расходов воды с заблаговременностью Δt к среднеквадратической погрешности их расчета $S(0)$. Это отношение определяется формулой:

$$U(\Delta t) = \frac{S(\Delta t)}{S(0)} = \sqrt{\frac{1 - NSE(\Delta t)}{1 - NSE(0)}}. \quad (3.2)$$

Значения данного отношения приведены в табл. 3.12.

Данные табл. 3.12 показывают, что для всех рассматриваемых речных бассейнов отношение $U(\Delta t)$ увеличивается с ростом заблаговременности прогноза Δt от 1 до 3 суток. В среднем отношение равно 1,17 для прогнозов с заблаговременностью 1 сутки, 2,25 для прогнозов с заблаговременностью 2 суток и 3,27 для прогнозов с заблаговременностью 3 суток.

Таким образом, негативная роль ошибок метеорологических прогнозов при их заблаговременности 1 сутки относительно невелика. Погрешность прогнозов расхода воды с заблаговременностью 2 суток превышает погрешность прогнозов с суточной заблаговременностью

в среднем в 1,9 раза, а с заблаговременностью трое суток – почти в 2,8 раза. Столь стремительный рост среднеквадратической погрешности прогнозов с увеличением их заблаговременности не обязательно приводит к снижению их эффективности по сравнению с инерционным прогнозом, так как его погрешность также растет (см. табл. 3.10).

Таблица 3.12

Значения отношения $U(\Delta t)$ для прогнозов различной заблаговременности Δt

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	1,17	2,35	3,52
Обва	с. Карагай	1,13	1,85	3,00
Иньва	д. Слудка	1,02	2,16	3,19
Иньва	г. Кудымкар	1,03	2,13	2,83
Кама	с. Лойно	1,73	3,46	5,00
Колва	г. Чердынь	1,18	2,77	4,18
Чусовая	пгт Староуткинск	1,07	1,93	2,42
Сылва	с. Сылвенск	1,19	2,65	3,75
Сылва	пгт. Шамары	1,03	1,99	1,51

Сравнение методик прогнозирования

Помимо рассматриваемой методики, основанной на модели HBV-96 и системе COSMO-Ru, для получения краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды в тех же речных створах бассейна Камы был использован рассмотренный в предыдущей главе метод экстраполяции гидрографа. Получаемые этим методом прогнозы проверялись по той же контрольной выборке, образованной ежедневными гидрологическими наблюдениями за период с 01.01.2017 по 31.12.2020.

Для сравниваемых методик значения показателя S/σ_{Δ} при заблаговременности прогнозов $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведены в табл. 3.10 и 3.13.

Приведенные в таблицах показатели качества свидетельствуют о том, что сравниваемые методики дают в основном удовлетворительные и в ряде случаев хорошие результаты. Неудовлетворительные значения $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ выделены красным цветом.

Для первой методики, основанной на модели HBV-96 и системе COSMO-Ru, неудовлетворительными оказались 2 варианта прогноза, то есть из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 25 вариантов – 92,6 %.

Таблица 3.13

**Значения показателя S/σ_{Δ} для прогнозов, полученных
методом экстраполяции гидрографа**

Река	Пункт	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
Коса	с. Коса	0,47	0,49	0,54
Обва	с. Карагай	0,80	0,81	0,85
Иньва	д. Слудка	0,63	0,72	0,77
Иньва	г. Кудымкар	0,62	0,77	0,85
Кама	с. Лойно	0,56	0,63	0,67
Колва	г. Чердынь	0,49	0,65	0,76
Чусовая	пгт Староуткинск	0,78	0,89	0,92
Сылва	с. Сылвенск	0,80	0,86	0,88
Сылва	пгт. Шамары	0,53	0,69	0,77

Для второй методики, использующей метод экстраполяции гидрографа, неудовлетворительными оказались 7 вариантов прогноза, то есть из 27 вариантов прогноза удовлетворительными и хорошими оказались 20 вариантов – 74,1 %.

Преимущество первой методики выражается и другим показателем: она оказалась точнее для 6 речных бассейнов при заблаговременности 1 сутки, для тех же 6 речных бассейнов при заблаговременности 2 суток и для 8 речных бассейнов при заблаговременности 3 суток. В целом из 27 прогнозов первая методика оказалась точнее второй в 20 случаях – 74 %.

Возрастающее преимущество первой методики по мере увеличения заблаговременности прогноза проявляется и в том, что ее погрешность в среднем оказалась меньше в 1,03 раза при заблаговременности 1 сутки, в 1,09 раза при заблаговременности 2 суток и в 1,26 раза при заблаговременности 3 суток.

Таким образом, для краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы использование модели его формирования HBV-96 в сочетании с метеорологической моделью COSMO-Ru и последующей коррекцией получаемых прогнозов в целом дает более точные результаты, чем метод экстраполяции гидрографа. Однако следует иметь в виду, что реализация этого метода требует несопоставимо меньших затрат времени и труда, что обеспечивает его конкурентоспособность.

Глава 4.

ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

4.1. Неопределенность метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока

Постановка задачи

Большинство используемых в настоящее время методов долгосрочного прогнозирования речного стока пока основаны на его физико-статистических зависимостях от известных к дате составления прогноза характеристик гидрологических и метеорологических факторов [78, 123]. В последние десятилетия все шире используются различные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными, то есть изменяющимися в пространстве параметрами, и концептуальные модели с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [56, 61, 92, 94, 122, 132].

Погрешность долгосрочных прогнозов речного стока определяется:

- ошибками в исходных данных (погрешность в измерениях, анализе и расчете исходной информации);
- репрезентативностью и объемом исходных данных;
- адекватностью и полнотой описания процессов формирования речного стока;
- точностью определения параметров методики прогноза;
- ролью метеорологических элементов и неопределенностью их хода в течение заблаговременности прогноза [13, 56, 122, 123].

По мере увеличения технических возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза становится ведущим фактором, определяющим качество прогнозирования речного стока [13, 56, 92, 80].

Современные достижения в области сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик пока не дают оснований для их регулярного использования в долгосрочных прогнозах речного стока [114, 147]. В связи с этим использование моделей формирования речного стока в долгосрочных прогнозах его характеристик сопровождается применением ансамблевого подхода, который предусматривает учет наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза [56, 61, 122].

Данный подход представляется вполне оправданным, однако он может вносить весомый вклад в погрешность долгосрочных прогнозов речного стока. Оценке вклада этой метеорологической составляющей в погрешность прогноза речного стока и посвящен настоящий раздел.

Оценка влияния неопределенности хода метеорологических характеристик

Рассматривается ситуация, когда для долгосрочного прогнозирования характеристики речного стока Y используется модель его формирования. Как правило, модель описывает процессы формирования речного стока с шагом в одни сутки и на входе усваивает ежедневные гидрометеорологические данные. На первом этапе выходом модели являются среднесуточные расходы воды в замыкающем створе речного бассейна, а на втором этапе по этим расходам рассчитывается прогнозируемая характеристика речного стока [56, 61, 92, 122]. Модель усваивает образующие вектор Z известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики и образующие вектор X метеорологические характеристики, которые описывают погодные условия в течение периода заблаговременности прогноза, например ход осадков и температуры воздуха. Получаемое с помощью модели значение прогнозируемой характеристики речного стока определяется функцией $M(Z, X)$, которая выражается в неявном виде, но известна после калибровки модели. По результатам наблюдений за n лет для каждого года с номером i известны значения прогнозируемой характеристики Y_i и компоненты векторов Z_i и X_i при $i = 1, \dots, n$.

Чтобы исключить влияние неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза, для каждого года с номером i необходимо получить модельный расчет $M(Z_i, X_i)$ при известных для этого года значениях векторов Z_i и X_i . Качество самой модели характеризует среднеквадратическая погрешность модельных расчетов:

$$S_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - M(Z_i, X_i)]^2} . \quad (4.1)$$

Прогноз \tilde{Y}_i для года с номером i получается с применением ансамблевого подхода. Из возможно более продолжительного ряда X_1, \dots, X_N , берутся все значения, кроме X_i , подставляются в модель, и полученные результаты усредняются:

$$\tilde{Y}_i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^N M(Z_i, X_j) - M(Z_i, X_i) \right]. \quad (4.2)$$

Замечание 1

Необходимость в применении ансамблевого подхода возникает в случае, когда зависимость выхода модели, то есть величины $M(Z, X)$, от компонент вектора X носит нелинейный характер. В противном случае процедура получения прогноза существенно упрощается и прогноз определяется формулой:

$$\tilde{Y}_i = M(Z_i, \bar{X}_i), \quad (4.3)$$

где \bar{X}_i – среднее арифметическое всех векторов X_1, \dots, X_N , за исключением вектора X_i .

Среднеквадратическая погрешность прогноза определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}. \quad (4.4)$$

Замечание 2

При проверке расчетов и прогнозов на зависимом материале, который был использован для оценки параметров модели, формулы (4.1) и (4.4) дают заниженные значения оценок среднеквадратической погрешности расчета и прогноза, и такое занижение тем значительнее, чем больше число оцениваемых параметров [13]. Однако следует иметь в виду, что, как правило, оценка этих параметров выполняется на основе ежедневных данных гидрологических и метеорологических наблюдений в течение всего года. Следовательно, продолжительность рядов этих наблюдений с учетом високосных лет в среднем составляет $n \cdot 365,25$, что многократно больше обычно используемого числа оцениваемых параметров модели и схемы корректировки ее выходов. С учетом указанного обстоятельства систематическими ошибками оценок S_M и S можно пренебречь.

Погрешность прогноза S всегда превосходит погрешность расчета S_M , и обусловлено это именно неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности. Возникающее

в результате этой неопределенности дополнительное слагаемое среднего квадрата ошибки прогноза равно:

$$S_{met}^2 = S^2 - S_M^2. \quad (4.5)$$

Замечание 3

Если модельный расчет линейно зависит от компонент вектора X и отсутствует корреляция между ошибкой модельного расчета и этими компонентами, то отношение S_{met} / σ равно множественному коэффициенту корреляции прогнозируемой величины от компонент вектора X при заданном значении вектора Z . Таким образом, дополнительное увеличение погрешности прогноза зависит от степени влияния на прогнозируемую величину характеристик погодных условий в период его заблаговременности [27].

Влияние неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности прогноза речного стока предлагается характеризовать величиной:

$$f = (S_{met}^2 / S^2) \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

которая может варьировать от 0 % до 100 %.

Замечание 4

Степень влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в период заблаговременности гидрологического прогноза на его погрешность зависит не только от климатических условий речного бассейна, но и от особенностей применяемой методики. В частности, если используемая в методике прогноза модель формирования стока позволяет настолько точно рассчитывать его прогнозируемую характеристику, что погрешность модельных расчетов S_M практически равна нулю, то определяемый формулами (4.5) и (4.6) показатель f будет практически равным 100 % при любых климатических условиях речного бассейна [27].

Примеры оценки влияния неопределенности метеорологических характеристик

Ниже приводятся примеры оценки метеорологической составляющей погрешности долгосрочных прогнозов речного стока, основанных на различных моделях формирования речного стока и использующих ансамблевый подход. Для каждой методики приводятся следующие показатели:

– рассчитанная по формуле (4.4) среднеквадратическая погрешность прогноза S ;

- рассчитанная по формуле (4.1) среднеквадратическая погрешность модельных расчетов S_M ;
- рассчитанный по формуле (4.5) показатель S_{met} ;
- рассчитанный по формуле (4.6) показатель влияния неопределенности хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности прогноза f .

Пример 1

В ИВП РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока ЕСОМАГ разработаны методики долгосрочного прогнозирования объема незарегулированного притока воды в Чебоксарской водохранилище за второй квартал W_{II} км³ и максимального расхода этого притока Q_{max} м³/с [16]. Использован ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза, который получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 год, то есть $N = 48$. Проверочные прогнозы выполнены по данным наблюдений с 1982 по 2014 год, то есть $n = 33$ [22]. В табл. 4.1 приведены показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище.

Таблица 4.1

Показатели качества расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

Характеристика	S	S_M	S_{met}	f
W_{II}	5,32	2,81	4,52	72%
Q_{max}	2539	1163	2257	79%

Приведенные в табл. 4.1 данные свидетельствуют о значительном вкладе неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза на погрешность прогнозирования объема притока и о еще большем вкладе в погрешность прогнозирования максимального расхода незарегулированного притока воды за второй квартал. Значительный вклад неопределенности хода метеорологических элементов обусловлен характерными для водосбора Чебоксарского водохранилища оттепелями и снегопадами в начале и дождями – в конце второго квартала [49].

Пример 2

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна

Оки в течение маловодного периода года. В основе методики лежит южнокорейская концептуальная модель DWAT [132]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2005 по 2021 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы, то есть $n = N = 17$. В табл. 4.2 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга в течение маловодного периода с июля по март следующего года. В целях повышения надежности этих показателей приводятся их осредненные значения для всего маловодного периода, а также отдельно для осени и зимы.

Таблица 4.2

Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга

Период	S	S_M	S_{met}	f
Маловодный	45,8	38,0	25,5	31%
Осень	35,0	28,5	20,3	34%
Зима	46,5	40,2	20,5	26%

Показатель f значительно ниже, чем в предыдущем случае. Это объясняется достаточно устойчивым спадом расходов воды в результате истощения запасов воды в речном бассейне, накопленных в период половодья. В период заблаговременности прогноза (один месяц) устойчивость спада нарушается выпадением осадков в виде дождя и быстро таящего снега, а также температурным режимом, определяющим начало и конец зимы, а также возможные оттепели [56]. Значения показателя f указывают на то, что для бассейна Оки неопределенность выпадения осадков осенью оказывает большее влияния на погрешность прогнозов, чем неопределенность температурного режима зимой.

Пример 3

По заказу ФГБУ «Уральское УГМС» в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Камы в течение зимнего периода. В основе методики лежит шведская концептуальная модель HBV-96 [94, 82]. При разработке и проверке методики учитывались ежедневные данные гидрометеорологических наблюдений за период с 2002 по 2020 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за те же годы,

то есть $n = N = 19$. В табл. 4.3 приведены показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново с декабря (XII) по февраль (II) следующего года.

Таблица 4.3

Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Вишера у пос. Рябиново

Месяц	S	S_M	S_{met}	f
XII	38,4	22,7	31,0	65%
I	22,3	16,4	15,1	46%
II	17,8	11,7	13,4	57%

Показатель f незначительно изменяется от месяца к месяцу. Он существенно выше аналогичного показателя для бассейна Оки в зимний период ($f = 0,26$) при отсутствии явных причин климатического характера, так как в бассейне Камы зима более суровая и оттепели практически отсутствуют [27]. В данном случае причина кроется в относительно меньшей погрешности модельных расчетов (см. замечание 4).

Пример 4

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе модели HBV-96 разработана система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Тобола в течение маловодного периода с июля (VII) по февраль (II) следующего года и среднего расхода стока половодья за второй квартал. При разработке и проверке методик использованы данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 год. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов брался за те же годы, то есть $n = N = 22$. В табл. 4.4 приведены показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Тобол – г. Курган.

Таблица 4.4

Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Тобол – г. Курган

	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	2 квартал
S	2,93	3,60	7,07	1,37	1,04	0,82	0,73	0,60	0,59	48,6
S_M	2,03	1,98	3,02	1,02	0,89	0,64	0,64	0,47	0,47	32,9
S_{met}	2,12	3,01	6,39	0,92	0,54	0,51	0,35	0,37	0,35	35,8
f	52%	70%	82%	45%	27%	38%	22%	38%	35%	54%

Показатель f принимает наиболее высокие значения для прогнозов стока за август и сентябрь, когда спад водности реки может прерываться дождевыми паводками. Минимальные значения он принимает в холодный период года с ноября по март, когда река Тобол покрыта льдом [74].

Пример 5

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для бассейна Дона разработана аналогичная система методик долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды в течение маловодного периода и среднего расхода стока за второй квартал. Данные ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период с 2000 по 2021 год использовались для разработки и проверки методик, а также для получения ансамбля сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогнозов. В табл. 4.5 приведены показатели качества расчетов и прогнозов указанных характеристик в створе р. Дон – г. Серафимович.

Таблица 4.5

Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных и среднеквартальных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович

	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	2 квартал
S	48,2	31,8	29,4	29,8	44,7	57,8	87,9	62,6	177
S_M	35,4	25,9	22,9	26,4	29,9	31,9	47,2	33,1	105
S_{met}	32,6	18,5	18,4	13,8	33,3	48,1	74,1	53,1	142
f	46%	34%	39%	21%	55%	69%	71%	72%	65%

На реке Дон половодье начинается в марте, поэтому этот месяц не включен в маловодный период. В последние десятилетия в зимние месяцы все чаще наблюдаются оттепели, которые приводят к тому, что спад водности реки прерывается поступлением талых вод в русловую сеть [45]. Неопределенность хода влияющих на речной сток метеорологических элементов в эти месяцы максимальна и возрастает от декабря к февралю. Паводки в летне-осенние месяцы незначительны, поэтому неопределенность хода метеорологических элементов в эти месяцы минимальна. Помещенные в табл. 4.5 значения показателя f достаточно хорошо отражают отмеченные особенности формирования стока реки Дон.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая оценка f влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологического

прогноза на его погрешность в достаточной степени согласуется с условиями формирования стока рассматриваемых рек.

2. Эта оценка зависит не только от климатических условий формирования речного стока, но и от точности его моделирования. При снижении погрешности модельных расчетов она возрастает и может приближаться к 100 %.

3. По мере увеличения возможностей получения гидрометеорологической информации и внедрения все более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза будет основным фактором, определяющим качество его прогнозирования.

4.2. Неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока

При разработке общих методов и конкретных методик долгосрочного прогнозирования стока рек и притока воды в водохранилища одну из главных проблем составляет неопределенность пространственно-временной изменчивости характеристик его формирования. Приемы частичного устранения этой неопределенности предусматривают осреднение вероятных колебаний этих характеристик в течение периода заблаговременности прогноза или их распределения по территории водосбора.

Осреднение вероятных колебаний характеристик формирования речного стока в период заблаговременности прогноза широко используется при долгосрочном прогнозировании месячного стока рек или притока воды в водохранилища в маловодный период года. В частности, осреднение возможных отклонений от предполагаемого экспоненциального спада водности после прохождения волны половодья приводит к известной линейной формуле получения прогноза характеристики месячного стока или притока в зависимости от аналогичной характеристики за предыдущий месяц [78]. Пример достаточно успешной реализации такого подхода для долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище приведен в работе [26].

При долгосрочном прогнозировании стока весеннего половодья не менее важную роль играет осреднение характеристик формирования речного стока по территории водосбора. В связи с этим необходимо обратить внимание на одно важное в методическом отношении обстоятельство.

Осреднение характеристик процессов формирования речного стока в пространстве приводит к трансформации физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока

и используемых в современных физико-математических моделях. Подобную трансформацию демонстрируют следующие примеры.

Пример 1

Рассмотрим последствия пространственного осреднения процесса склонового стока. В каждой точке водосбора расход воды поверхностного и внутрипочвенного склонового стока q определяется расходом поступления на его поверхность талых и дождевых вод h и расходом потерь p на испарение, поверхностное задержание, восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта. В каждой точке водосбора эти величины связаны физически обоснованным соотношением:

$$q = q(h, p) = \begin{cases} 0, & \text{если } h \leq p; \\ h - p, & \text{если } h > p. \end{cases} \quad (4.7)$$

Если обозначить через $f(h, p)$ совместную плотность пространственного распределения расхода поступления воды h и расхода потерь p , то средний для всего водосбора расход воды склонового стока определяется формулой:

$$\bar{q} = \int_0^{\infty} \int_p^{\infty} (h - p) f(h, p) dh dp. \quad (4.8)$$

При различных вариантах определения функции $f(h, p)$ получаются следующие результаты.

1. Пусть расход поступления воды h постоянен для всего водосбора и, следовательно, равен своему среднему значению \bar{h} . Пространственное распределение расхода потерь p описывается показательным распределением со средним значением \bar{p} . Тогда уравнение (4.7) трансформируется в предложенную Е.Г. Поповым формулу:

$$\bar{q} = \bar{h} - \bar{p} \left(1 - e^{-\frac{\bar{h}}{\bar{p}}}\right). \quad (4.9)$$

2. Пусть расход потерь p постоянен для всего водосбора и, следовательно, равен своему среднему значению \bar{p} . Пространственное распределение расхода поступления воды h описывается показательным распределением со средним значением \bar{h} . Тогда уравнение (4.7) трансформируется в формулу:

$$\bar{q} = \bar{h} e^{-\frac{\bar{p}}{\bar{h}}}. \quad (4.10)$$

3. Пусть пространственное распределение расхода поступления воды h и расхода потерь p не зависят друг от друга и описываются показательным распределением со средними значениями \bar{h} и \bar{p} соответственно. Тогда уравнение (4.7) трансформируется в формулу:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{1 + \frac{\bar{p}}{\bar{h}}}. \quad (4.11)$$

Пример 1 демонстрирует, что при различных вариантах пространственного распределения расхода поступления воды и расхода потерь общий характер зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от средних значений этих величин \bar{h} и \bar{p} такой же, как и у определяемой уравнением (4.7) зависимости q от величин h и p в каждой точке водосбора. Однако в каждом конкретном случае зависимость \bar{q} от величин \bar{h} и \bar{p} определяется формулой, принципиально отличающейся от определяемого физикой рассматриваемого явления теоретического уравнения (4.7).

Пример 2

Предположим, что при описании одного из процессов формирования речного стока и в соответствующем блоке физико-математической его модели характеристики X, Y и Z связаны физически обоснованной формулой $Y = g(X, Z)$. При этом на момент составления прогноза величина X известна, а величина Z – нет. В результате осреднения теоретической формулы по вероятным значениям неизвестной величины Z она трансформируется следующим образом:

$$Y = \bar{g}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} g(X, Z) f(Z | X) dZ, \quad (4.12)$$

где $f(Z | X)$ – условная плотность распределения вероятностей величины Z при заданном значении X . Если исходная теоретическая функция имеет вид $g(X, Z) = a(X)b(Z)$, то в результате осреднения характер зависимости Y только от X при фиксированном значении Y сохранится, так как будет описываться функцией $\bar{g}(X) = \bar{b}a(X)$. Характер зависимости Y от X сохранится и в случае, когда функция

$g(X, Z)$ является линейной комбинацией функций вида $a(X)b(Z)$. Во всех остальных случаях характер зависимости Y от X в теоретической формуле $Y = g(X, Z)$ и в осредненной формуле $Y = \bar{g}(X)$ будут различными.

Возвращаясь к первому примеру, рассмотрим зависимость среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от средних значений расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} и расхода потерь на испарение, поверхностное задержание, восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта \bar{p} . В качестве величин X, Y и Z рассматриваются характеристики половодья \bar{h} , \bar{q} и \bar{p} .

Предположим, что зависимость $\bar{q} = g(\bar{h}, \bar{p})$ определяется формулой (4.10), которая соответствует постоянному для всего водосбора расходу потерь \bar{p} и показательному пространственному распределению расхода поступления воды на его поверхность со средним значением \bar{h} . При отсутствии данных о состоянии почвенного покрова и грунтов к началу половодья и при отсутствии прогноза его ожидаемого изменения в период заблаговременности прогноза величина средних по водосбору потерь \bar{p} является неизвестной и, следовательно, должна рассматриваться как случайная.

1. При нормальном распределении вероятностей этой величины с математическим ожиданием m_p и дисперсией D_p формулы (4.9) и (4.11) приводят к зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} , которая имеет следующий вид:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{\sqrt{2\pi D_p}} \text{Exp}\left(-\frac{2m_p\bar{h} - D_p}{\bar{h}^2}\right). \quad (4.13)$$

где Exp – обозначение экспоненциальной функции.

2. При показательном распределении вероятностей величины \bar{p} с математическим ожиданием m_p формулы (4.10) и (4.12) приводят к зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} , которая имеет следующий вид:

$$\bar{q} = \frac{\bar{h}}{1 + \frac{m_p}{\bar{h}}}. \quad (4.14)$$

Пример 2 демонстрирует, что при различных вариантах распределения вероятностей возможных значений расхода потерь общий характер зависимости среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока \bar{q} от среднего значения расхода поступления воды на его поверхность \bar{h} остается таким же, как и в исходной формуле (4.10). Однако в каждом конкретном случае зависимость \bar{q} от величины \bar{h} определяется формулой, принципиально отличающейся от исходного соотношения (4.10).

Влияние пространственной изменчивости характеристик речного стока учитывается путем их усреднения. Применение для этой цели различных вариантов распределения вероятностей для учета этой изменчивости приводит к трансформации физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования талого и дождевого стока. Выбор таких вариантов основан не на теории пространственно-временной изменчивости речного стока и его факторов, а на сложившихся традициях и опыте их применения в гидрологических прогнозах.

Каждый вариант аналитического описания распределения характеристик условий формирования речного стока в пространстве или их изменчивости во времени основан на некоторой статистической гипотезе, которую нельзя доказать, а можно лишь проверить ее непротиворечивость данным наблюдений [80]. Таким образом, попытки устранения неопределенности пространственно-временной изменчивости приводят к исчезновению физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования талого и дождевого стока в отдельной точке водосбора и в конкретный момент времени. Остаются только связи между имеющимися на дату составления прогноза характеристиками ожидаемого половодья. Общий вид этих зависимостей соответствует исходным теоретическим формулам, однако они отражают специфику конкретного водосбора и располагаемой гидрометеорологической информации, на основе статистического анализа которой и должны оцениваться.

Проблемы с использованием физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока, могут быть обусловлены не только неопределенностью некоторых характеристик этих процессов, но недостатком информации о постоянных для водосбора факторах. К таким факторам относятся рельеф, почвенный и растительный покров, гидрогеологические условия, форма строения и гидравлические характеристики русла основной реки, ее притоков и временных водотоков.

Например, даже в концептуальных моделях формирования речного стока, предназначенных для краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды на реках в условиях достаточно точного прогнозирования метеорологических элементов на период заблаговременности

прогноза, именно нехватка информации о гидравлических характеристиках русловой сети вынуждает отказаться от системы уравнений Сен-Венана. Для описания процесса трансформации склонового и руслового стока используется интеграл Дюамеля, который связывает изменение во времени расхода воды в замыкающем створе $Q(t)$ и среднего для всего водосбора расхода воды склонового стока $\bar{q}(t)$ формулой:

$$Q(t) = \int_0^t \bar{q}(t-\tau)K(\tau)d\tau, \quad (4.15)$$

где функция $K(\tau)$ описывает кривую добегания. За $t = 0$ обычно принимается начало половодья [56, 57]. Формула (4.15) соответствует «генетической» формуле стока и в простейшем виде выражает одновременность добегания до замыкающего створа склонового и руслового стока с различных частей бассейна. С математической точки зрения формула (4.15) означает, что функция $Q(t)$ выражается через функцию $\bar{q}(t)$ с помощью стационарного линейного оператора при условии, что $Q(t)$ не зависит от $\bar{q}(t)$ при $\tau > t$. В ряде случаев в правую часть формулы (4.15) добавляется расход воды грунтового стока (базисного) $Q_{sp}(t)$ из глубоких водоносных горизонтов [3, 13, 29, 33, 50]. Для небольших горных рек такое решение вызывает ряд обоснованных возражений, так как линейность данного оператора означает постоянство времени бассейнового добегания при прохождении паводков любой высоты. Кроме того, интеграл Дюамеля не учитывает возникновение подпора в узлах слияния. Тем не менее использованию формулы (4.15) редко удается найти альтернативу [33, 52, 54, 56, 161].

Изложенные выше причины в достаточной степени обосновывают эмпирический подход к разработке общих методов и конкретных методик долгосрочного прогнозирования элементов водного режима рек и притока воды в водохранилища. Уравнение водного баланса и информация о различных процессах, определяющих формирование и режим талого и дождевого стока, учитываются косвенно – для обоснования состава предикторов и общего вида прогностической зависимости. В конечном итоге формулы или графики, определяющие способ получения прогноза для конкретного водосбора, являются результатом статистического анализа данных многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений.

Наглядной иллюстрацией сказанного служит принятый подход к долгосрочному прогнозированию важнейшей характеристики водного режима – объема, среднего расхода воды или слоя стока Y за период половодья. Уравнение водного баланса и информация о процессах

формирования талого и дождевого стока определяют общий характер зависимости величины Y от слоя поступления воды на поверхность речного бассейна X и слоя потерь талого и дождевого стока E . Эта зависимость описывается схематическим графиком, представленным на рис. 4.1 [79].

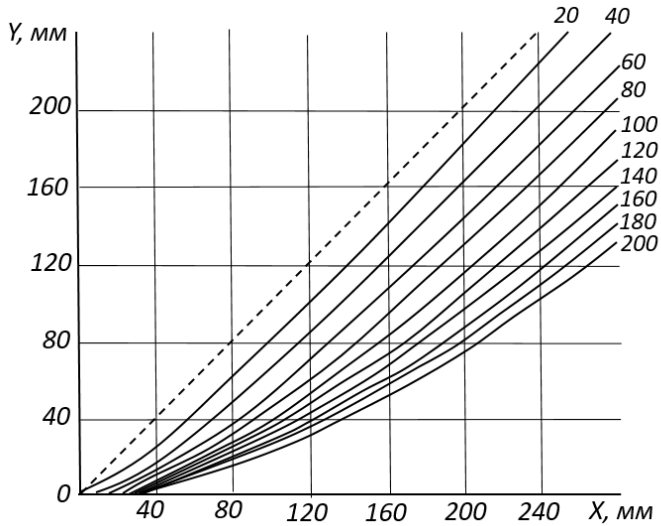


Рис. 4.1. Схематический график зависимости слоя стока половодья Y от слоя поступления воды X и потерь талого и дождевого стока E .

Для равнинных рек с преобладанием внутрипочвенного подпертого и подвешенного склонового стока показатель потерь стока половодья p определяется в зависимости от различных характеристик влажности почвы и степени ее промерзания. Для горных рек с преобладанием подпертого поверхностного и контактного склонового стока роль показателя X накопившихся к началу половодья запасов воды в снежном покрове и осадков за период половодья является доминирующей. Запасы воды в снежном покрове на горных склонах определяют не только основную часть поступления воды на поверхность водосбора, но и потери талого стока на испарение. Роль потерь на поверхностное задержание невелика. Потери талого стока на восполнение запасов воды в почве и отток влаги в нижележащие слои грунта при «провальном» поступлении талых вод в слой рыхлых отложений также косвенно характеризуется показателем запасов воды в снеге. В результате для таких горных водосборов показатель потерь стока половодья E может приниматься постоянным, а представленный на рис. 4.1 схематический график может определяться одной линией [3, 79].

Таким образом, неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока приводит к тому, что содержащиеся в схемах получения его долгосрочных прогнозов физически обоснованные теоретические и полутеоретические формулы превращаются в чисто эмпирические. При получении этих формул необходимо учитывать статистические свойства гидрометеорологической информации, располагаемой к дате составления долгосрочного прогноза речного стока. Примеры достаточно успешной реализации такого подхода представлены в следующих разделах.

4.3. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола

Постановка задачи

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье является характерной фазой водного режима большинства рек России, включая реки бассейна Тобола. Объем или слой стока за период весеннего половодья или за какой-либо жестко обозначенный интервал времени, например за второй квартал, является практически очень важной гидрологической характеристикой. Ее прогноз с достаточными заблаговременностью и точностью позволяет определить эффективный режим сработки и наполнения водохранилищ в предвесенний и весенний периоды, а также использование водных ресурсов в последующие месяцы. Не менее важной характеристикой является максимальный уровень воды за период весеннего половодья в заданном речном створе, прогноз которого определяет вероятные зоны затопления прилегающих к этому створу территорий и необходим для организации мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов [78, 137].

В течение многих лет исследование процессов формирования весеннего половодья находится в центре внимания мировой и прежде всего отечественной гидрологии [55, 57, 61, 78, 105, 107, 122, 137]. В настоящее время эти процессы можно считать достаточно хорошо изученными, поэтому точность долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья определяется уровнем гидрометеорологической изученности конкретного речного бассейна и лимитируется неопределенностью хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза, который составляется перед началом весеннего половодья [28, 124].

Методы, применяемые в отечественной оперативной практике долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья, отражены в Выпуске 1 Руководства по гидрологическим прогнозам, изданном

в 1989 году [78]. В основном такие прогнозы реализуются с помощью физико-статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик факторов весеннего половодья [13, 124].

Эти зависимости должны уточняться по мере накопления данных гидрометеорологических наблюдений и происходящих климатических и антропогенных изменений условий формирования стока весеннего половодья. Причем могут уточняться не только параметры этих зависимостей, но их вид и состав используемых в них предикторов. Одновременно должна расширяться сфера применения подобных зависимостей для прогнозирования стока весеннего половодья все большего количества рек. В связи с этим для рек бассейна Тобола в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны методики долгосрочного прогнозирования характеристик их весеннего стока [1].

Общие сведения о рассматриваемых водосборах

Река Тобол берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки расположено в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган [74].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белооярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [28].

Питание рек бассейна Тобола в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье длится с 1-й половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях – в ноябре, вскрывается во 2-й половине апреля – 1-й половине мая. Основной сток (от 50 до 75 %) приходится на весеннее половодье. Именно в этот период наблюдаются максимальные уровни воды [28, 74]. Характерными особенностями формирования половодья на реках бассейна Тобола являются достаточно глубокое промерзание почвы за счет низких зимних температур и наличие относительно больших постоянно бессточных площадей, обусловленных плоским рельефом [78].

Методики долгосрочного прогнозирования слоя стока за второй квартал и максимального уровня воды для 7 рек бассейна Тобола на основе данных многолетних гидрометеорологических наблюдений за период с 1968 по 2021 год. В табл. 4.6 для этих створов помещены

номера соответствующих гидрологических постов, название реки и пункта, площадь водосбора км², норма слоя стока за второй квартал \bar{Y}_{II} мм и его коэффициент вариации C_V .

Таблица 4.6

Основные характеристики исследуемых водосборов

Индекс	Река	Пункт	Площадь км ²	\bar{Y}_{II} мм	C_V
12014	Тобол	г. Курган	159000	6,22	0,96
12043	Уй	п. Плодовый	7660	28,4	0,68
12127	Исеть	с. Мехонское	52300	27,5	0,69
12239	Тура	г. Туринск	29000	99,2	0,39
12315	Ница	г. Ирбит	17300	67,9	0,46
12412	Тавда	с. Таборы	74200	98,3	0,32
12611	Сосьва	с. Морозково	11500	123,7	0,25

Заниженное значение слоя стока за второй квартал в створе р. Тобол – г. Курган вызвано заполнением водохранилищ на территории Казахстана в весенний период.

Выбор водосборов обусловлен запросами ФГБУ «Уральское УГМС» на разработку методики долгосрочного прогнозирования весеннего стока и стремлением учесть сам Тобол и его основные притоки.

Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 2.10.

В табл. 4.7 для рассматриваемых водосборов представлено осредненное за многолетний период распределение стока по месяцам в процентах от объема годового стока.

Таблица 4.7

Внутригодовое распределение месячного стока, %

Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тобол	2	2	2	25	40	9	5	4	3	3	3	2
Уй	1	1	3	55	14	6	5	5	3	3	2	1
Исеть	3	3	3	30	20	10	7	6	5	5	5	3
Тура	2	1	2	12	34	16	8	7	6	6	4	2
Ница	2	2	3	28	23	10	7	6	5	6	4	3
Тавда	2	1	1	5	22	24	15	8	7	7	5	3
Сосьва	2	2	2	9	28	17	10	8	8	7	4	3

Приведенные данные показывают, что на второй квартал, в течение которого проходит весеннее половодье, приходится от 50 до 75 % годового стока.

Долгосрочное прогнозирование слоя речного стока за второй квартал

В современной гидрологии процессы формирования стока половодья достаточно хорошо изучены и описываются различными физико-математическими и концептуальными моделями [55, 61, 78, 105, 107, 122]. Эти модели широко используются в краткосрочных прогнозах речного стока, однако при его долгосрочном прогнозировании возникают проблемы, связанные с неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза и отсутствием необходимых гидрометеорологических наблюдений [57, 61, 78, 124]. В связи с этим для долгосрочного прогнозирования характеристик стока весеннего половодья применяются различные эмпирические формулы, реализующие физико-статистический подход [13, 78, 137].

Для рассматриваемого региона слой талого и дождевого стока за период половодья Y мм рекомендуется выражать формулой:

$$Y = \alpha[X - E(U)]th[X / E(U)], \quad (4.16)$$

где α – параметр, учитывающий долю бессточных площадей в бассейне; X мм – слой поступившей на поверхность бассейна воды за счет таяния снега и выпадения осадков за период половодья; th – знак гиперболического тангенса; $E(U)$ мм – свободная емкость бассейна, которая определяет потери весеннего стока и является функцией от показателя предшествующего увлажнения водосбора U . При отсутствии непосредственно измеренных данных о влажности почвы накануне начала половодья используются различные варианты определения показателя U и функции $E(U)$ [78].

В частности, в качестве показателя предшествующего увлажнения U Д.А. Бураковым предложено использовать слой стока за период с сентября по ноябрь предшествующего года за вычетом его минимального наблюдавшегося значения, а для расчета свободной емкости бассейна была предложена формула:

$$E(U) = E_{\max} - A \lg(U + 1). \quad (4.17)$$

Параметры α , E_{\max} и A подлежат оценке по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений для каждого конкретного речного бассейна [29, 30].

Суммарный слой стока половодья Y_n определяется путем прибавления к величине Y слоя базисного стока, определяемого по минимальным расходам воды предвесеннего периода. Слой стока за второй квартал Y_{II} определяется по его линейной и, как правило, весьма тесной зависимости от величины Y_n [78].

Формулы (4.16), (4.17) и подобные им являются физически обоснованными и в целом хорошо зарекомендовавшими себя на практике, однако они не исчерпывают возможности получения прогноза характеристик весеннего стока. В целях повышения эффективности подготовки и выпуска прогнозов желательно, чтобы используемая эмпирическая формула обладала следующими дополнительными свойствами:

- 1) она должна адекватно описывать зависимость прогнозируемой величины от используемых предикторов в реально наблюдаемом диапазоне их вероятных значений;
- 2) эта зависимость должна быть достаточно тесной;
- 3) содержащиеся в ней параметры должны максимально просто оцениваться по многолетнему ряду гидрометеорологических наблюдений.

С учетом данного обстоятельства на основе статистического анализа располагаемых для рассматриваемых речных бассейнов данных многолетних гидрометеорологических наблюдений и оценки применимости различных формул прогнозирования слоя стока за второй квартал Y_{II} мм был выбран вариант, в котором используются следующие предикторы:

- S_{\max} мм – полученный по результатам снегомерных маршрутов и осредненный по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове, известный к дате составления прогноза 25 марта и характеризующий поступление талых вод на поверхность водосбора;
- $\ln(Q_{XI})$ – логарифм среднего расхода воды за ноябрь предыдущего года, характеризующий предзимнее увлажнение водосбора;
- Q_{III} м³/с – средний расход воды за месяц, предшествующий дате выпуска прогноза, фактически – мартовский сток, и характеризующий базисный сток перед началом половодья.

В реально наблюдаемом диапазоне вероятных значений слоя стока за второй квартал и используемых предикторов зависимость Y_{II} от S_{\max} , $\ln(Q_{XI})$ и Q_{III} носит линейный характер, поэтому предлагаемая формула получения долгосрочного прогноза \tilde{Y}_{II} слоя стока за второй квартал имеет вид:

$$\tilde{Y}_{II} = a_0 + a_1 S_{\max} + a_2 \ln(Q_{XI}) + a_3 Q_{III}. \quad (4.18)$$

Параметры формулы (4.18) оценивались методом наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 год продолжительностью $n = 54$ года [1]. В течение этого периода в бассейне Тобола не произошло значительных климатических изменений условий формирования половодья, а антропогенная нагрузка стабилизировалась [28]. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Значения параметров формулы (4.18)

Река	a_0	a_1	a_2	a_3
Тобол	-4,80	-0,04	3,61	0,07
Уй	-0,65	0,16	17,34	0,18
Исеть	-76,0	0,18	22,05	0,21
Тура	-76,0	0,8	16,57	0,70
Ница	-74,4	0,52	28,17	0,16
Тавда	-83,4	0,77	17,25	-0,05
Сосьва	-35,8	0,38	26,59	0,61

При использовании формулы (4.18) необходимо иметь в виду, что в редких случаях, когда прогнозируемое значение \tilde{Y}_{II} оказывается отрицательным, его следует заменять нулем.

Долгосрочное прогнозирование максимального уровня воды за период половодья

Для получения прогноза максимального уровня воды H_{\max} см за период весеннего половодья используется его зависимость от слоя стока половодья Y_n мм или слоя стока за второй квартал Y_{II} мм. Эта зависимость часто бывает нелинейной, что затрудняет ее применение [78, 123]. Пример такой зависимости представлен на рис. 4.2.

Следует, однако, заметить, что при прогнозировании максимальных уровней воды используются не фактические значения слоя стока за половодье или за второй квартал, а их прогнозы. Содержащиеся в этих прогнозах ошибки увеличивают разброс точек на графике. Этот разброс маскирует особенности этого графика и в частности его нелинейность. В результате зависимость максимального уровня воды от прогноза слоя стока выравнивается. Пример такого эффекта представлен на рис. 4.3.

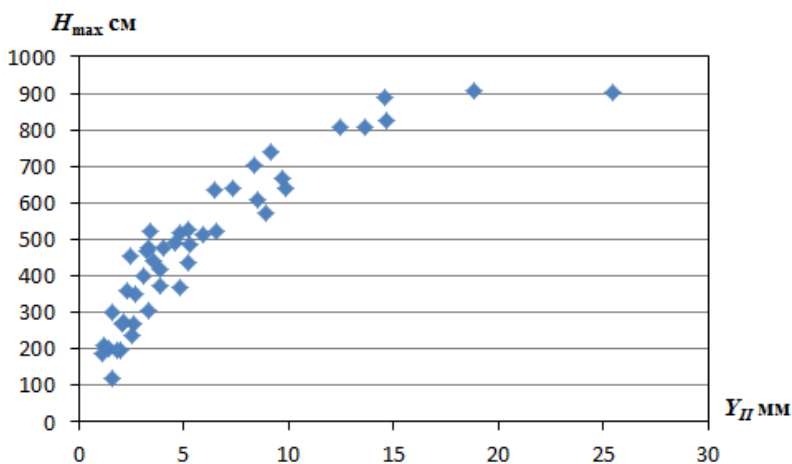


Рис. 4.2. Зависимость максимального уровня воды H_{\max} от слоя стока за второй квартал Y_{II} в створе р. Тобол – г. Курган.

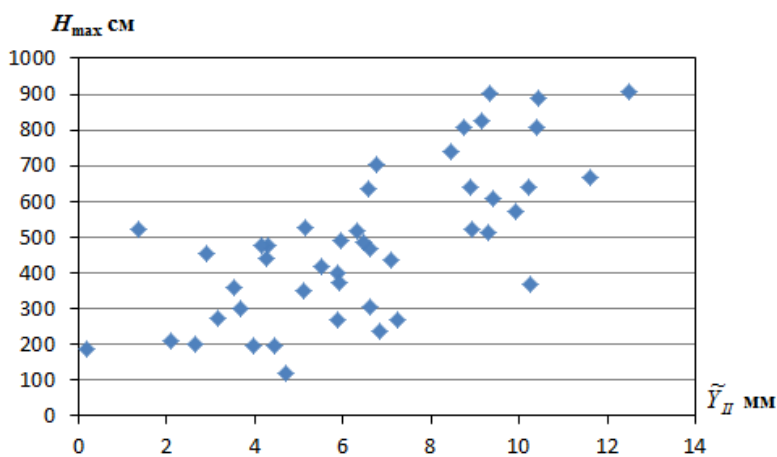


Рис. 4.3. Зависимость максимального уровня воды H_{\max} от прогноза по формуле (4.18) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} в створе р. Тобол – г. Курган.

Приблизительно линейный характер зависимости максимального уровня воды H_{\max} от прогноза по формуле (4.18) слоя стока за второй квартал \tilde{Y}_{II} приводит к линейному виду зависимости максимального уровня воды за период половодья H_{\max} от предикторов S_{\max} , $\ln(Q_{XI})$

и Q_{III} . Это позволяет предложить следующую формулу получения долгосрочного прогноза \tilde{H}_{\max} :

$$\tilde{H}_{\max} = b_0 + b_1 S_{\max} + b_2 \ln(Q_{XI}) + b_3 Q_{III}. \quad (4.19)$$

Максимальные уровни весеннего половодья на реках бассейна Тобола наблюдаются в апреле и мае [28, 74]. Следовательно, прогноз \tilde{H}_{\max} по формуле (4.19) может быть получен 25 марта, когда значения всех предикторов уже известны. Параметры формулы (4.19) также оценивались методом наименьших квадратов по ряду фигурирующих в ней переменных за период с 1968 по 2021 год [1]. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих параметров приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Значения параметров формулы (4.19)

Река	b_0	b_1	b_2	b_3
Тобол	-62	-0,93	172,36	0,49
Уй	247,9	0,10	133,62	-6,97
Исеть	246,3	-0,08	7,95	4,74
Тура	-213	3,58	109,74	0,95
Ница	178,8	1,47	110,46	-1,78
Тавда	75,3	2,56	86,39	-0,50
Сосьва	283,0	1,08	54,50	4,95

Верификация методик прогнозирования

В целях верификации предлагаемых методик фактические значения слоя стока за второй квартал Y_{II} и максимального уровня воды H_{\max} сравнивались с их прогнозами \tilde{Y}_2 и \tilde{H}_{\max} . Анализировался ряд ошибок проверочных прогнозов за период с 1968 по 2021 год продолжительностью $n = 54$ года. Для всех рассматриваемых речных бассейнов средние значения ошибок проверочных прогнозов по предлагаемым методикам оказались равными нулю, то есть методики не дают систематических ошибок прогноза.

Проверка выполнялась на независимом материале, который использовался при оценке параметров формул (4.18) и (4.19). В целях получения несмещенных оценок среднеквадратической погрешности прогноза S по обоим методикам использовался рассмотренный в разделе 1.2 главы 1

метод 1, в котором учитывается соотношение между длиной ряда проверочных прогнозов $n = 54$ и числом $k = 4$ оцениваемых параметров формул (4.18) и (4.19) [1, 13].

Согласно Наставлению по службе прогнозов [63] эффективность каждой методики оценивалась соотношением S/σ среднеквадратической погрешности получаемых с ее помощью прогнозов к погрешности климатического прогноза [9].

В табл. 4.10 приведены следующие показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал:

- коэффициент корреляции R между фактическими значениями и их прогнозами;
- среднеквадратическая погрешность прогноза S мм;
- показатель эффективности прогноза S/σ ;
- оправдываемость прогноза P , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674\sigma$.

Таблица 4.10

Показатели качества прогнозов слоя стока за второй квартал

Река	R	S	S/σ	P
Тобол	0,73	2,4	0,43	83%
Уй	0,69	14,6	0,71	67%
Исеть	0,77	14,0	0,72	77%
Тура	0,82	22,3	0,57	75%
Ница	0,83	17,3	0,56	71%
Тавда	0,75	21,3	0,67	86%
Сосьва	0,68	24,1	0,73	68%

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов долгосрочные прогнозы слоя стока за второй квартал по предлагаемой методике могут быть отнесены к категории удовлетворительных или хороших (р. Тобол).

В табл. 4.11 приведены аналогичные показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья.

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что для всех рассматриваемых бассейнов долгосрочные прогнозы максимального уровня воды за период половодья по предлагаемой методике также могут быть отнесены к категории удовлетворительных.

В целях демонстрации эффективности предлагаемой методики долгосрочного прогнозирования максимального уровня воды показатели ее

качества для бассейна р. Тобол у г. Курган сравниваются с аналогичными показателями методики, разработанной в ФГБУ «Уральское УГМС» на основе рекомендаций, содержащихся в Руководстве по гидрологическим прогнозам [78]. Методика включает предварительное получение прогноза слоя весеннего половодья в зависимости от осредненных по территории водосбора максимальных запасов воды в снеге, осадков и температуры воздуха с третьей декады июля по дату установления снежного покрова предыдущего года. Для получения прогноза максимальных уровней воды используется их эмпирическая зависимость от значений слоя весеннего половодья.

Таблица 4.11

Показатели качества прогнозов максимального уровня воды за период половодья

Река	R	S	S/σ	P
Тобол	0,75	143	0,61	69%
Уй	0,71	82,7	0,71	68%
Исеть	0,68	73,8	0,73	71%
Тура	0,86	86,1	0,51	88%
Ница	0,81	55,5	0,55	80%
Тавда	0,73	78,2	0,67	66%
Сосьва	0,66	77,0	0,75	64%

Статистический анализ ряда ошибок прогноза по методике ФГБУ «Уральское УГМС» дал следующие результаты:

- 1) среднее значение ошибки прогноза равно $-85,4$ см;
- 2) среднеквадратическая погрешность прогноза равна $S = 183$ см;
- 3) отношение среднеквадратической погрешности прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины равно $S/\sigma = 0,78$;
- 4) оправдываемость прогнозов равна $P = 61$ %.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [63] исходная методика также может быть признана удовлетворительной, однако она превышает максимальные уровни воды на $85,4$ см, погрешность ее прогнозов значительно больше, а оправдываемость меньше, чем у предлагаемой методики [1].

Таким образом, правильный учет располагаемых к дате составления долгосрочного прогноза характеристик весеннего стока позволил получить методики, которые могут быть использованы в целях научного обоснования мероприятий по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения и хозяйственных объектов от наводнений в период весеннего половодья.

4.4. Долгосрочное прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище

Общие сведения

Цимлянское водохранилище на реке Дон заполнено в 1953 году, имеет полезный объем – 11,5 км³ и осуществляет многолетнее регулирование в интересах судоходства, ирригации и гидроэнергетики. Площадь водосбора в створе Цимлянского гидроузла составляет 255 тыс. км² [167].

Приток воды в водохранилище определяется по данным наблюдений на гидрологических постах и уточняется расчетами водного баланса. Река Дон дает около 94 % притока воды в Цимлянское водохранилище. В течение всего года, за исключением пика весеннего половодья, ежедневные данные о расходах этого притока рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – г. Калач-на-Дону, имеющего водосборную площадь 222 тыс. км².

В весенний период, когда данный пост находится в зоне подпора, ежедневные данные о расходах притока р. Дон в водохранилище рассчитываются по данным гидрологического поста р. Дон – ст. Новогригорьевская, который расположен в 52 км выше и имеет водосборную площадь 208 тыс. км². Боковой приток дает около 6 % притока. Боковая водосборная площадь Цимлянского водохранилища от плотины до г. Калач-на-Дону составляет 28 048 км². Для вычисления ежедневного бокового притока используются данные гидрометрических постов на реках Чир, Аксенец и Цимла, впадающих с правого берега водохранилища, и рек Иловля, Аксай Есауловский, Аксай Курмоярский, Тишанка и Панышинка, впадающих с левого берега [58].

Краткосрочные с заблаговременностью 1–5 суток, среднесрочные с заблаговременностью 6–12 суток и долгосрочные прогнозы притока воды в Цимлянское водохранилище за различные интервалы времени от суток до квартала необходимы для обеспечения обоснованного режима его наполнения и сработки. Они позволяют снизить вероятность нежелательного повышения уровня воды в водохранилище и возникновения дефицита воды в его нижнем бьефе [4].

В связи с имевшими в последние десятилетия значительными климатическими и антропогенными изменениями условий формирования притока воды в Цимлянское водохранилище разработанные ранее методики его прогнозирования стали устаревшими и уже не имеют требуемой точности. В связи с этим в настоящей статье предлагаются новые методики, основанные на предоставленной ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» гидрометеорологической информации за последние десятилетия.

Климатические и антропогенные изменения водного режима притока в Цимлянское водохранилище

До начала 1930-х годов условия формирования стока р. Дон и его притоков незначительно отличались от естественных. Доля снегового питания составляла 70 %, дождевого – менее 10 %, подземного – около 20 %. Было характерно высокое половодье и низкая межень в остальное время года. Осенние паводки были выражены слабо, летние – крайне редки [41, 167].

В течение последних десятилетий в бассейне р. Дон отмечается потепление климата и увеличение его влажности. В наибольшей степени потепление климата повлияло на среднюю температуру воздуха холодного периода с ноября по март, которая возросла более чем на 2 °С. Повышение температуры холодного периода сопровождается увеличением суммы положительных температур за холодный период, частоты и продолжительности оттепелей. За последние сорок лет устойчивый переход к отрицательным температурам воздуха стал происходить позже в среднем на 10 суток. Средние даты начала пятидневного безморозного периода сместились в сторону более ранних чисел на 12 суток. Таким образом, зима стала короче, позже начинается и раньше заканчивается. За этот же период годовая сумма осадков возросла на 3 %, при этом сумма осадков за холодный период возросла на 11 %. Благодаря участвующим оттепелям статистически достоверного увеличения запасов воды в снежном покрове на конец февраля пока не обнаружено [31, 45, 50].

Антропогенная нагрузка в бассейне Дона оценивается как очень высокая. До начала 1990-х годов она имела тенденцию к увеличению, в последующие десять лет она снизилась, для последних двадцати лет характерна стабилизация [8, 42, 50, 166].

Прямое воздействие на речной сток оказывают безвозвратный забор воды на орошение, промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, а также строительство прудов, водохранилищ и каналов. Безвозвратный забор воды превышал 5 млн м³/год, за последние тридцать лет он снизился до 3 млн м³/год [31, 45, 50].

Регулирование речного стока в бассейне Дона осуществляется 48 крупными водохранилищами, включая Цимлянское, и около 12 тысячами прудов и малых водохранилищ. Переброска стока происходит благодаря Волго-Донскому каналу, расположенному выше Цимлянского водохранилища [8, 45, 50, 166].

К косвенным факторам хозяйственной деятельности, оказывающим влияние на условия формирования стока рек бассейна Дона, относятся агротехнические мероприятия, которые в целом приводят к его снижению, и урбанизация территории, приводящая к его незначительному увеличению [166].

Под влиянием климатических и антропогенных факторов произошло снижение годового стока реки Дон и изменчивости его многолетних колебаний. Сравнение первой (1911–1966 гг.) и второй (1967–2021 гг.) половин этого периода показало, что среднее значение расхода воды снизилось с 664 до 563 м³/с, а коэффициент вариации годового стока снизился с 0,40 до 0,29. Согласно стандартным критериям однородности, изложенным в работе [17], приведенные изменения являются статистически достоверными.

Более значительным оказалось выравнивание внутригодового распределения стока реки Дон и его притоков [41, 42, 45]. Это наглядно демонстрируют данные табл. 4.12, в которой приведены относительные значения месячного притока воды к створу Цимлянской ГЭС, осредненные для десятилетних периодов с 1911 по 1920 г. и с 2012 по 2021 год.

Таблица 4.12

**Относительные значения месячного притока воды
к створу Цимлянской ГЭС, %**

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1911–1920	2,5	3,3	9,4	41,6	24,4	4,5	2,9	2,6	2,1	2,2	2,3	2,3
2012–2021	5,6	5,6	9,4	19,8	19,3	9,3	5,8	4,8	4,4	4,7	5,7	5,7

Приведенные данные показывают, что доля стока половодья с марта по май снизилась более чем в полтора раза с 75,4 до 48,5 %, в то время как доля меженного стока возросла более чем в два раза с 24,6 до 51,5 %.

Начиная с 1970-х годов благодаря участвовавшим оттепелям и зяблевой вспашке объем стока половодья снизился на 30–40 %, а его максимальные расходы снизились на 40–60 %. Практически на всех реках бассейна начало половодья и дата прохождения его максимума в среднем сместились на 7–12 дней в сторону более ранних значений. В то же время окончание половодья стало запаздывать в среднем на 5–10 дней. Таким образом, продолжительность более низкого половодья увеличилась на 10–20 дней. Сравнение первой и второй половин периода наблюдений показало, что среднее значение апрельского расхода воды снизилось с 2613 до 1595 м³/с, а коэффициент вариации апрельского стока снизился с 0,61 до 0,46. Произошло также существенное увеличение подземного питания рек бассейна Дона и, как результат, значительное увеличение летне-осеннего и зимнего стока на 40–70 %. Среднее значение сентябрьского расхода воды возросло с 204 до 273 м³/с [45]. Отмеченные изменения также являются статистически достоверными [31, 45, 50].

Анализ климатических и антропогенных изменений водного режима рек бассейна Дона приводит к следующим выводам.

1. Методики прогнозирования характеристик притока воды в Цимлянское водохранилище, разработанные при его проектировании и в первые десятилетия его работы, следует признать устаревшими и не соответствующими современным условиям.

2. Уточнение этих методик и разработка новых должны опираться на данные гидрометеорологических наблюдений только за последние десятилетия.

Долгосрочное прогнозирование месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

С учетом климатических особенностей и водного режима рек водосбора Цимлянского водохранилища маловодный период года может начинаться и заканчиваться раньше или позже в зависимости от погодных условий конкретного года, но в среднем он длится с июня по февраль следующего года. По окончании основной волны весеннего половодья происходит спад притока воды в Цимлянское водохранилище в течение летних месяцев, вызванный истощением запасов подземных вод. В осенние и зимние месяцы, как правило, наблюдается повышение притока за счет выпадения жидких осадков и частых зимних оттепелей [45, 167]. В табл. 2 приведены характеристики притока воды в водохранилище в течение маловодного периода: среднемесячный расход воды \bar{Q} м³/с, коэффициент вариации среднемесячных расходов воды Cv и коэффициент корреляции R между средним расходом каждого месяца и средним расходом предыдущего месяца. При этом для января учитывался средний расход декабря предшествующего года.

Таблица 4.13

Характеристики притока воды в течение маловодного периода

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
\bar{Q} м ³ /с	558	369	309	294	332	372	358	383	397
Cv	0,41	0,25	0,23	0,20	0,19	0,23	0,29	0,30	0,25
R	0,81	0,77	0,92	0,90	0,82	0,86	0,90	0,79	0,75

Современная теория прогнозирования речного стока в меженный период опирается на достаточно хорошо изученные факторы его формирования и пространственно-временной изменчивости. Как правило, возможности долгосрочного прогнозирования меженного стока ограничиваются уровнем гидрометеорологической изученности водосбора. Эти ограничения возникают при недостаточно развитой сети гидрометрических наблюдений для оценки русловых запасов воды, сети

гидрогеологических наблюдений для оценки состояния подземных вод и сети метеорологических наблюдений для оценки возможного талого и дождевого стока в начале и в конце межлетнего периода [78, 124].

Для получения долгосрочного прогноза среднемесячного расхода притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года используется традиционный метод, основанный на достаточно высокой корреляции между средними расходами воды смежных месяцев [26]. В зависимости от среднемесячного расхода воды предыдущего месяца Q_{i-1} прогноз среднего за последующий месяц расхода воды определяется по формуле:

$$\tilde{Q}_i = a_i Q_{i-1} + b_i. \quad (4.20)$$

Для каждого месяца маловодного периода параметры формулы получения прогноза оценивались методом наименьших квадратов на основе рядов среднемесячных расходов притока воды в водохранилище за период с 1985 по 2021 год. Для прогноза январского стока 1985 года использовался средний расход декабря 1984 года. Параметры формулы (4.20) для каждого месяца маловодного периода года помещены в табл. 4.14.

Таблица 4.14

Параметры формулы (4.20) получения прогноза среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище в маловодный период года

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
a_i	0,248	0,300	0,727	0,745	0,883	1,147	1,084	0,862	0,657
b_i	226	201	40,7	64,2	72,3	-8,77	-45,6	75,2	145,4

Для каждого месяца маловодного периода с номером i проверка предлагаемой методики выполнена по ряду $Q_{i,1} - \tilde{Q}_{i,1}, \dots, Q_{i,n} - \tilde{Q}_{i,n}$ ошибок проверочных прогнозов продолжительностью $n = 36$ для января и $n = 37$ для остальных месяцев маловодного периода. Предварительная оценка среднеквадратической погрешности прогноза рассчитывалась по формуле:

$$\hat{S}_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - \tilde{Q}_{i,j})^2}. \quad (4.21)$$

Полученная на зависимом материале данная оценка систематически занижает погрешность прогноза. В соответствии с рекомендациями

работы [13] данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке

$$S_i = \hat{S}_i \left(\frac{n}{n-m} \right), \quad (4.22)$$

где m – число оцениваемых параметров, в данном случае равное $m = 2$.

В целях оценки эффективности предлагаемой методики в качестве альтернативы использован климатический прогноз, который для месяца с номером i выражается нормой \bar{Q}_i прогнозируемой величины, рассчитанной по ряду $Q_{i,1}, \dots, Q_{i,n}$. Погрешность климатического прогноза принято характеризовать стандартным отклонением этого ряда:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}. \quad (4.23)$$

Для каждого месяца вывод о применимости методики прогнозирования основан на соотношении S_i / σ_i : методика считается хорошей при $S_i / \sigma_i \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S_i / \sigma_i \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S_i / \sigma_i > 0,80$ [63].

В табл. 4.15 для каждого месяца с номером i маловодного периода помещены следующие показатели качества прогнозов:

- среднеквадратическая погрешность прогноза S_i м³/с;
- показатель эффективности прогноза S_i / σ_i ;
- оправдываемость прогноза P_i , равная частоте случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали значение допустимой ошибки $0,674 \sigma_i$.

Приведенные показатели свидетельствуют о том, что предлагаемая методика позволяет получать хорошие и удовлетворительные долгосрочные прогнозы месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в маловодный период года [26].

Таблица 4.15

**Показатели качества предлагаемой методики прогнозирования
среднемесячных расходов притока в Цимлянское водохранилище
в маловодный период года**

Месяцы	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
S_i	137	58,7	27,4	26,3	37,5	43,4	46,4	70,5	67,6
S_i / σ_i	0,59	0,65	0,39	0,45	0,59	0,51	0,45	0,62	0,68
P_i	82%	82%	91%	85%	85%	91%	88%	76%	68%

Долгосрочное прогнозирование весеннего притока воды в Цимлянское водохранилище

Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье в бассейне реки Дон является основной фазой водного режима, в течение которой проходит от 40 до 70 % годового стока. Основная волна половодья наблюдается в апреле и мае, а в июне идет ее спад. Половодье часто происходит в виде двух волн. Первая возникает за счёт поступления в русло талых вод из нижней части бассейна, а вторая образуется водами, поступающими с верхнего Дона. Иногда, при запаздывании снеготаяния в нижней части бассейна, обе волны сливаются и половодье становится более высоким, но менее продолжительным [167].

Ежегодное долгосрочное прогнозирование слоя весеннего половодья для рек бассейна Дона выполняется в конце февраля каждого года ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» и ФГБУ «Гидрометцентр России» по методике В.Д. Комарова, разработанной в 60-е годы прошлого века. В качестве предикторов используются осредненные по территории водосбора максимальный запас воды в снежном покрове; запас воды в ледяной корке; запас влаги в метровом слое почвы за четыре предзимних месяца; максимальная глубина промерзания почвы [51, 78].

При прогнозировании слоя весеннего притока в Цимлянское водохранилище используется долгосрочный прогноз $\hat{Y}_{нов}$ поверхностной составляющей слоя весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович. Долгосрочный прогноз подземной составляющей слоя весеннего половодья в этом же створе $\hat{Y}_{подз}$ определяется по минимальному расходу воды за предшествующую зиму. Тесная зависимость между объемом притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал и слоем стока весеннего половодья в створе р. Дон – г. Серафимович с коэффициентом корреляции 0,98 позволяет прогнозировать объем притока воды в водохранилище за второй квартал по формуле:

$$\hat{W}_{II} = 0,24(\hat{Y}_{нов} + \hat{Y}_{подз}). \quad (4.24)$$

С учетом рассмотренных выше климатических и антропогенных изменений условий формирования стока рек бассейна Дона предлагается методика долгосрочного прогнозирования объема притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал. Методика основана на данных гидрометеорологических наблюдений за период с 1985 по 2021 год. При составлении прогноза в конце марта осредненный по территории водосбора слой осадков за этот месяц X_{III} уже практически известен и может быть учтен в качестве дополнительного предиктора [26]. Формула получения прогноза имеет вид:

$$\tilde{W}_{II} = 0,78 \hat{W}_{II} + 0,08 X_{III} - 0,24. \quad (4.25)$$

Рассмотренные выше показатели качества прежней (прогноз \hat{W}_{II}) и предлагаемой (прогноз \tilde{W}_{II}) методик для периода с 1985 по 2018 год приведены в табл. 4.16.

Таблица 4.16

Показатели качества прогнозов притока воды в Цимлянское водохранилище за второй квартал

Прогноз	S	S/σ	P
\hat{W}_{II}	2,74	0,77	73%
\tilde{W}_{II}	2,17	0,64	83%

Приведенные в табл. 4.16 данные свидетельствуют о том, что обе методики дают удовлетворительные прогнозы, но предлагаемая методика точнее прежней на 20 %.

Прогнозирование месячного притока в Цимлянское водохранилище за второй квартал

Для получения долгосрочного прогноза объема W_i км³ притока воды в Цимлянское водохранилище за отдельные месяцы второго квартала, то есть за апрель, май, июнь с соответствующими номерами $i = 4, 5, 6$, в качестве предикторов могут быть использованы предварительно полученный по формуле (4.25) прогноз \tilde{W}_{II} притока за весь второй квартал и объем притока W_{i-1} за предыдущий месяц [26]. С учетом данного обстоятельства долгосрочный прогноз \tilde{W}_i объема притока за месяц с номером i предлагается определять с помощью простейшей линейной формулы:

$$\tilde{W}_i = a \tilde{W}_{II} + b W_{i-1} + c. \quad (4.26)$$

Для каждого месяца с номерами $i = 4, 5, 6$ параметры формулы (4.26), полученные методом наименьших квадратов по рядам значений W_i , \tilde{W}_{II} и W_{i-1} при $i = 4, 5, 6$ за период с 1985 по 2018 год, помещены в табл. 4.17.

В табл. 4.18 для каждого месяца второго квартала помещены значения среднеквадратической погрешности прогнозов S км³; показателя эффективности прогнозов S/σ и оправдываемости прогнозов P .

Таблица 4.17

**Параметры формулы (4.26) получения долгосрочного прогноза
месячного притока в Цимлянское водохранилище**

Месяц	i	a	b	c
Апрель	4	0,35	0,13	0,54
Май	5	0,36	0,25	-0,36
Июнь	6	-0,05	0,30	0,79

Таблица 4.18

**Показатели качества прогнозов месячного объема
притока воды в Цимлянское водохранилище**

Месяц	S	S/σ	P
Апрель	1,25	0,74	79%
Май	1,45	0,72	68%
Июнь	0,35	0,59	81%

Приведенные в табл. 4.18 показатели качества прогнозов свидетельствуют о том, что предлагаемая методика долгосрочного прогнозирования объема месячного притока в Цимлянское водохранилище для всех месяцев второго квартала может быть отнесена к категории удовлетворительных [26].

4.5. Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги

Общие рекомендации по оптимизации наблюдательной сети

При долгосрочном прогнозировании весеннего стока рек бассейна Верхней Волги и притока воды в Рыбинское и Горьковское водохранилища в качестве основного предиктора учитываются осредненные по водосбору значения максимальных запасов воды в снежном покрове, которые ежегодно определяются на основе данных сети снегомерных маршрутов [49, 78].

Существовавшая в бассейне Верхней Волги до 1989 года сеть снегомерных маршрутов была практически оптимальной с точки зрения требований гидрологического прогнозирования [65, 80, 138]. За последние 28 лет произошло существенное сокращение числа снегомерных маршрутов с 75 до 45. Таким образом, оптимизация сети

снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги может быть сведена к обоснованному восстановлению некоторых закрытых ранее маршрутов и закрытию других, действующих в настоящее время [20].

Процедура закрытия и восстановления пунктов наблюдений может быть рассмотрена для произвольной гидрометеорологической характеристики Z , используемой в гидрологическом прогнозировании. В зависимости от этой характеристики в качестве таких пунктов могут рассматриваться:

- гидрологические станции и посты для определения характеристик стока в соответствующих речных створах;
- метеорологические станции для определения слоя осадков и других необходимых метеорологических характеристик;
- снегомерные маршруты для определения максимальных запасов воды в снежном покрове;
- агрометеорологические станции для определения глубины промерзания и влажности почвы.

Обозначим через m число пунктов наблюдения, которые использовались для определения характеристики Z до начала закрытия некоторых из них. К этому сроку на всех m пунктах наблюдения проводились в течение n лет. После этого прошло еще n_0 лет. Обозначим через m_0 число пунктов, действующих в настоящее время. Если после начала закрытия некоторых пунктов прошло n_0 лет, то к настоящему времени на оставшихся пунктах наблюдения ведутся уже в течение $n + n_0$ лет.

Таким образом, для каждого пункта с номером $i = 1, \dots, m$ имеется многолетний ряд значений характеристики Z продолжительностью n_i лет, которая варьирует в пределах от минимального значения n до максимального значения $n + n_0$. Этот ряд может быть использован для получения стандартных статистических оценок математического ожидания M_i и дисперсии D_i характеристики Z . Оценка коэффициента корреляции r_{ij} между многолетними колебаниями этой характеристики в пунктах $i, j = 1, \dots, m$ может быть получена на основе совместного для этих пунктов ряда наблюдений за одни и те же годы продолжительностью n_{ij} , которая также может варьировать в пределах от n до $n + n_0$.

Для каждого пункта с номером i рассматриваемая характеристика может интерполироваться по данным ближайших $k = 1 - 3$ пунктов. Значения рассматриваемой гидрометеорологической характеристики в этих пунктах целесообразно обозначить как Z_{ij} при значениях $j = 1, \dots, k$. Интерполируемое значение выражается формулой:

$$\tilde{Z}_i = M_i + \sum_{j=1}^k a_{ij} \sqrt{\frac{D_i}{D_{ij}}} (Z_{ij} - M_{ij}). \quad (4.27)$$

Коэффициенты a_1, \dots, a_k выражаются с помощью элементов корреляционной матрицы

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{00} & r_{01} & \dots & r_{0k} \\ r_{01} & r_{11} & \dots & r_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k0} & r_{k1} & \dots & r_{kk} \end{pmatrix}, \quad (4.28)$$

в которой $r_{00} = r_{11} = \dots = r_{kk} = 1$; r_{0j} – коэффициент корреляции между величинами Z_i и Z_{ij} ; r_{sj} – коэффициент корреляции между величинами Z_{is} и Z_{ij} [89].

Если обозначить через A_{0j} и A_{00} алгебраические дополнения элементов r_{0j} и r_{00} в матрице \mathbf{R} , то коэффициенты в формуле (4.27) определяются для всех $j = 1, \dots, k$ как

$$a_{ij} = -\frac{A_{0j}}{A_{00}}. \quad (4.29)$$

Для каждого года разность $Z_i - \tilde{Z}_i$ между фактическим и интерполируемым значениями рассматриваемой гидрометеорологической характеристики определяет ошибку интерполяции. При условии однородности используемых рядов и отсутствия корреляции между их членами среднее значение квадрата этой ошибки равно

$$V(\tilde{Z}_i) = M[(Z_i - \tilde{Z}_i)^2] = \frac{(n-1)^2}{(n-k-1)(n-k-2)} D_i (1 - R_i^2), \quad (4.30)$$

где R_i – множественный коэффициент корреляции между величиной Z_i и величинами Z_{i1}, \dots, Z_{ik} [13]. Этот показатель тесноты зависимости характеристики Z для пункта i от ее значений для k соседних пунктов выражается через определитель $|R|$ корреляционной матрицы \mathbf{R} и алгебраическое дополнение A_{00} элемента r_{00} формулой:

$$R_i = \sqrt{1 - \frac{|R|}{A_{00}}}. \quad (4.31)$$

В целях оптимизации процедуры восстановления и закрытия пунктов наблюдения, используемых для определения характеристики Z ,

погрешность ее интерполяции следует определять не только для закрывшихся, но и для оставшихся пунктов. Содержащийся в формуле (4.30) множитель при величине $D_i(1 - R_i^2)$ практически одинаков и близок к единице для всех m пунктов. Исходя из этого, оптимизация конфигурации рассматриваемой сети гидрометеорологических наблюдений может опираться на анализ значений среднеквадратической погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_i = \sqrt{D_i(1 - R_i^2)}$ для всех $i = 1, \dots, m$.

При определении оптимального числа сохраняемых, восстанавливаемых и закрываемых пунктов наблюдений в качестве безусловных кандидатов на закрытие следует считать пункты с аномально низкими погрешностями интерполяции $\tilde{\sigma}_i$. Для выявления таких пунктов рекомендуется использовать критерий Граббса – Смирнова или критерий Диксона [89]. Оба этих статистических критерия предназначены для обнаружения резко выделяющихся членов ряда независимых случайных величин, подчиняющихся нормальному распределению вероятностей. Распределение вероятностей оценок $\tilde{\sigma}_i$ может иметь значительную положительную асимметрию, поэтому рекомендуется анализировать их логарифмы $b_i = \ln \tilde{\sigma}_i$ для всех $i = 1, \dots, m$. Ряд этих величин располагается в возрастающем порядке, образуя вариационный ряд $b_{(1)} \leq \dots \leq b_{(m)}$, в котором наименьший член ряда равен $b_{(1)}$, а наибольший равен $b_{(m)}$.

Уровень значимости каждого критерия, то есть вероятность ошибочного выделения значения $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, рекомендуется принимать равным 10 %.

Критерий Граббса – Смирнова определяет значение $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, если выполняется неравенство:

$$G = \frac{\bar{b} - b_{(1)}}{S_b} \geq 3, \quad (4.32)$$

где \bar{b} и S_b – стандартные оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения, полученные по ряду $b_{(1)}, \dots, b_{(m)}$.

Критерий Диксона определяет значение $b_{(1)}$ в качестве аномально низкого, если выполняется неравенство:

$$D = \frac{b_{(2)} - b_{(1)}}{b_{(n)} - b_{(1)}} \geq 0,3. \quad (4.33)$$

Если для пункта с номером i с наименьшими значениями $\tilde{\sigma}_i$ и $b_i = b_{(1)}$ выполняется одно из приведенных неравенств, его надо

рассматривать в качестве безусловного кандидата на закрытие. После исключения этого пункта данные критерии следует применять к оставшимся членам укороченного ряда значений величины b с пересчетом всех статистических характеристик в неравенствах (4.32) и (4.33) и так далее вплоть до выявления всех пунктов с аномально низкими значениями погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_j$ и, следовательно, значениями b_j в качестве кандидатов на закрытие. Их число l_{\min} определяет нижний предел для оптимального числа закрываемых пунктов, а число $m - l_{\min}$ определяет верхний предел для числа сохраняемых и восстанавливаемых пунктов.

Для оставшихся пунктов рекомендуется руководствоваться следующими общими правилами.

1. Закрытие пункта с номером i и сохранение пункта с номером j следует считать необоснованным, если выполняется неравенство $\tilde{\sigma}_i > \tilde{\sigma}_j$.

2. Для кластера, образованного двумя и более близко расположенными пунктами с высокой синхронностью многолетних колебаний характеристики Z , и следовательно, низкими значениями погрешности ее интерполяции, должен быть оставлен один пункт с наибольшей дисперсией D_i .

3. Рекомендуется применение поливариантного подхода, который состоит в том, что для заданного числа m_0 сохраняемых и восстанавливаемых пунктов определяется оптимальный набор $m - m_0$ подлежащих закрытию пунктов, данные которых могут интерполироваться по оставшимся m_0 пунктам наилучшим образом.

4. При фиксированном числе сохраняемых пунктов m_0 закрытию должны подлежать $m - m_0$ пунктов с наименьшими значениями погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_i$.

4. Первым должен исключаться пункт с номером i , который имеет наименьшую погрешность интерполяции $\tilde{\sigma}_i$.

5. После исключения этого пункта для всех оставшихся пунктов с номерами $j \neq i$ значения погрешности интерполяции $\tilde{\sigma}_j$ должны быть пересчитаны таким образом, чтобы пункт с номером i уже не мог учитываться при получении интерполируемого значения. Это достигается путем исключения из корреляционной матрицы \mathbf{R} строки и столбца с номером i и последующего пересчета множественного коэффициента корреляции R_j .

6. Действия 5 и 6 должны последовательно повторяться вплоть до достижения заданного числа $m - m_0$ исключенных пунктов.

7. Оптимальное число и перечень оставляемых и закрываемых пунктов следует уточнять с учетом природных условий водосбора, специфики рассматриваемой гидрометеорологической характеристики и экономической целесообразности [20, 53, 71, 155].

Предложения по оптимизации сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги

В бассейне Верхней Волги сокращение числа снегомерных маршрутов началось с 1990 года. До этого в течение $n = 14$ лет периода с 1976 по 1989 год при получении прогнозов использовались данные $m = 75$ снегомерных маршрутов. В течение последних $n_0 = 28$ лет было закрыто $m - m_0 = 30$ снегомерных маршрутов. В настоящее время используются данные $m_0 = 45$ снегомерных маршрутов, для каждого из которых имеется ряд наблюдений за $n + n_0 = 42$ года. Расположение всех имевшихся ранее и действующих в настоящее время снегомерных маршрутов показано на рис. 4.4.

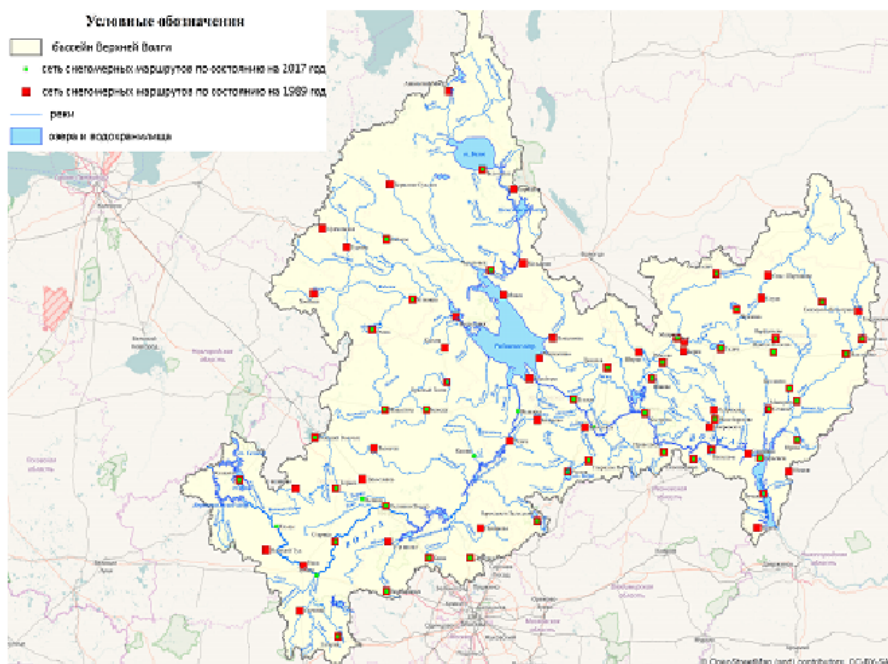


Рис. 4.4. Расположение снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги по состоянию на 1989 и 2017 гг.

В табл. 4.19 для каждого из 75 снегомерных маршрутов приведены оценки множественного коэффициента корреляции R_i получаемых на нем наблюдений с данными соседних пунктов, а также среднеквадратической погрешности $\tilde{\sigma}_i$ их возможной интерполяции. Там же приведены их ранги, которые соответствуют номеру каждого снегомерного маршрута при расположении всех пунктов в порядке возрастания погрешностей интерполяции. Закрытые к настоящему времени снегомерные маршруты выделены жирным шрифтом.

Таблица 4.19

Характеристики снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги

Маршрут	R_i	$\tilde{\sigma}_i$	Ранг	$m - m_0$		
				10	20	30
Троицкое	0,78	12	17	+	-	-
Белый	0,86	22,6	55			
Болшево	0,92	14,5	24	+	+	-
Волоколамск	0,87	15,2	29			-
В. Волочек	0,91	16,2	32			
Вязьма	0,87	9,3	8	-	-	-
Гагарин	0,84	18,4	41			
Емельяново	0,92	12,1	18	+	-	-
Тверь	0,87	22,6	56			
Кувшиново	0,96	6,9	4	-	-	-
Лихославль	0,77	17,1	36	+	+	+
Мол. Туд	0,81	16,1	30	+	+	-
Осташков	0,87	18	39			
Ржев	0,98	6,5	2	-	-	-
Сычевка	0,98	6,9	3	-	-	-
Торжок	0,91	18,7	42			
Тургиново	0,98	5,4	1	-	-	-
Толмачи	0,96	7,2	6	-	-	-
Старица	0,84	17,1	35			
Высоково	0,86	21,5	51	+	+	+
Дмитров	0,79	18,3	40			
Клин	0,85	17,4	37			
Нушполы	0,77	16,5	34	+	+	+
Переяславль-Залес.	0,7	30,3	72			
Углич	0,83	14,7	27	+	+	-
Анненский Мост	0,95	10,5	10	-	-	-
Бабаево	0,76	20,7	47			
Белозерск	0,68	21,4	50			
Б. Судское	0,95	12,2	19	+	-	-

Маршрут	R_i	$\tilde{\sigma}_i$	Ранг	$m - m_0$		
				10	20	30
Вытегра	0,68	27,1	68			
Ефимовская	0,76	33,6	75			
Кириллов	0,96	7	5	-	-	-
Конево	0,72	29,3	71			
Тихвин	0,74	27,6	69			
Семишино	0,81	7,3	7	-	-	-
Тургаш	0,91	10,8	11	+	-	-
Устряка	0,64	11,4	14	+	-	-
Чарозеро	0,72	26	64			
Череповец	0,8	19,9	46	+	+	+
Бежецк	0,88	14,7	26			-
Бологое	0,88	13	20		-	-
Кесьма	0,8	11,8	16	+	-	-
Кр. Холм	0,83	18,7	43			
Максатиха	0,89	16,2	33			
Милюшино	0,88	13,3	22	+	+	-
Охоны	0,85	17,5	38			
П. Володарское	0,86	11,7	15	+	-	-
Окуловка	0,64	19,4	44	+	+	+
Устюжна	0,59	25,3	63			
Боровичи	0,81	16,1	31	+	+	+
Буй	0,72	23,7	60			
Галич	0,72	21,9	52			
Данилов	0,76	26	65			
Кострома	0,78	22,7	57			
Рябцево	0,75	14,5	23	+	+	-
Солигалич	0,9	9,8	9	-	-	-
Чухлома	0,7	23,4	59			
Ямково	0,7	23,9	62			
Георгиевское	0,89	14,6	25	+	+	-
Екимцево	0,62	31,8	73			
Макарьев	0,72	20,9	49			
Мантурово	0,61	32,1	74			
М. Березово	0,73	26,2	66			
Н. Полома	0,73	28,4	70			
Гаврилов Ям	0,82	19,9	45			
Кинешма	0,95	11,4	12		-	-
Н.Писцово	0,95	11,4	13		-	-
Приволжск	0,82	20,8	48			
Пучеж	0,76	22	54			
Ростов Яр.	0,76	23,8	61			

Маршрут	R_i	$\tilde{\sigma}_i$	Ранг	$m - m_0$		
				10	20	30
Тутаев	0,74	26,6	67			
Шмаки	0,82	15	28	+	+	-
Юрьево	0,77	23	58			
Юрово	0,91	13,3	21	+	+	-
Ярославль	0,81	21,9	53			

Ранг 1 имеет маршрут «Тургиново» с минимальной погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 5,4$ мм, и следовательно, минимальным значением $b_{(1)} = 1,69$. Ранг 2 имеет маршрут «Ржев» с погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 6,5$ мм и вторым по величине снизу значением $b_{(2)} = 1,87$. Максимальный ранг 75 имеет маршрут «Ефимовская» с максимальной погрешностью интерполяции $\tilde{\sigma} = 33,6$ мм, и следовательно, максимальным значением $b_{(m)} = 3,51$.

Полученные по ряду $b_{(1)}, \dots, b_{(m)}$ стандартные оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения равны $\bar{b} = 2,81$ и $S_b = 0,43$. Статистика G критерия Граббса – Смирнова равна 2,60, и следовательно, неравенство (4.32) не выполняется. Статистика D критерия Диксона равна 0,10, и следовательно, неравенство (4.33) также не выполняется. Таким образом, среди всех 75 снегомерных маршрутов нет ни одного с аномально низкой погрешностью интерполяции, который можно было бы рассматривать в качестве безусловного кандидата на закрытие.

В связи с этим использован поливариантный подход при заданном числе $m - m_0$ подлежащих закрытию снегомерных маршрутов, равном 10, 20 и 30, и соответствующем числе m_0 сохраняемых и восстанавливаемых маршрутов, равном 65, 55, 45.

Последовательное выполнение изложенных выше рекомендаций позволило определить обоснованный перечень снегомерных маршрутов, которые должны быть сохранены или восстановлены. В табл. 4.19 для каждого варианта знаком «+» помечены ранее закрытые снегомерные маршруты, подлежащие восстановлению, а знаком «-» помечены маршруты, подлежащие окончательному закрытию.

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 10$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 21 ранее закрытом маршруте;

- 2) оставить закрытыми 9 снегомерных маршрутов;
- 3) дополнительно закрыть один действующий маршрут у г. Вязьма.

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 20$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 14 ранее закрытых маршрутах;
- 2) оставить закрытыми 16 снегомерных маршрутов;
- 3) дополнительно закрыть 4 действующих снегомерных маршрута.

В случае окончательного закрытия $m - m_0 = 30$ снегомерных маршрутов рекомендуется:

- 1) восстановить снегомерные наблюдения на 6 ранее закрытых маршрутах;
- 2) оставить закрытыми 24 снегомерных маршрута;
- 3) дополнительно закрыть 6 действующих снегомерных маршрутов.

Последний вариант заслуживает особого внимания, так как фактическое число $m - m_0$ закрытых снегомерных маршрутов равно именно 30. Анализ погрешностей пространственной интерполяции максимальных запасов воды в снежном покрове приводит к выводу о целесообразности оставить закрытыми 24 снегомерных маршрута из 30. Это свидетельствует о том, что сделанный ранее выбор закрываемых снегомерных маршрутов в 80 % случаев был научно обоснованным [20].

Глава 5.

СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ПРОГНОЗОВ И ИХ ДОВЕДЕНИЯ ДО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

5.1. Общие сведения о системах

Среди систем подготовки, выпуска прогнозов речного стока и их доведения до всех заинтересованных потребителей наибольшего внимания заслуживают системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях (СРП). Задача совершенствования таких систем, их методических основ, повышения надежности и увеличения заблаговременности выпускаемых прогнозов, напрямую связана с растущими потребностями населения и отраслей экономики, занимающихся использованием водных ресурсов, водных путей и эксплуатацией водохозяйственных систем. В условиях роста количества и интенсивности опасных природных явлений задача совершенствования системы гидрологического прогнозирования становится не только актуальной, но и жизненно важной для широкого круга потребителей прогностической продукции.

Вопросы предупреждения об опасных природных явлениях, в том числе о прохождении опасных паводков и наводнений на реках, находятся в приоритете у Национальных гидрометеорологических служб (НГМС), а также различных международных организаций, в том числе Всемирной метеорологической организации (ВМО), Управления ООН по уменьшению опасности бедствий, отделение по уменьшению риска бедствий Всемирного Банка. Например, в Сендайской рамочной программе по уменьшению риска бедствий приводятся четыре приоритетных направления и семь глобальных целевых задач по существенному снижению риска бедствий, которые непосредственно связаны с развитием СРП о паводках и наводнениях в НГМС [81].

В 2019 году ВМО, ЮНЕСКО, Управлением ООН по уменьшению опасности бедствий, а также другими партнерами была проведена Вторая Конференция по заблаговременному предупреждению о многих опасных явлениях. Итоги данной конференции легли в основу концепции по созданию СРП о многих опасных явлениях, согласно которым выделяется четыре приоритета при создании таких систем:

- информация о рисках бедствий;
- обнаружение, мониторинг, анализ и прогнозирование опасных явлений и их возможных последствий;
- распространение предупреждений и коммуникация возможности обеспечения готовности и реагирования [83].

Схематично направления СРП о многих опасных явлениях представлены на рис 5.1.



Рис. 5.1. Схема направлений СРП о многих опасных явлениях [15].

Инициатива ООН «Ранние предупреждения для всех» и план действий ВМО в рамках данной Инициативы рассмотрен и утвержден Всемирным метеорологическим конгрессом в 2021 году. С целью усиления поддержки НГМС по созданию СРП о многих опасных явлениях ВМО предпринимает следующие усилия: развитие Глобальной системы по предупреждению (ГМАС), создание Руководства по быстроразвивающимся паводкам с глобальным покрытием, внедрение системы прогнозирования наводнений в прибрежной зоне, а также Ассоциированной программы по управлению паводками и многие другие инициативы

[34, 43]. Для достижение данной цели работают постоянные комитеты и исследовательские группы технических комиссий ВМО, в том числе постоянный комитет по гидрологическому обслуживанию (ПК-ГИД) Комиссии по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, воды и соответствующих областях окружающей среды (СЕРКОМ), а также Постоянный комитет по уменьшению рисков бедствий и группы экспертов в области создания систем раннего предупреждения о многих опасных явлениях, а также группа экспертов по созданию Глобальной системы по предупреждению. Кроме того, на второй сессии СЕРКОМ, прошедшей в период с 17 по 21 октября 2022 г. в штаб-квартире ВМО в Швейцарии (г. Женева) было одобрено создание дорожной карты по развитию «СРП для всех» для адресного решения инициативы, выдвинутой Генеральным Секретарём ООН Антонио Гутьерешем (<https://public.wmo.int/en/media/press-release/%E2%80%8Bearly-warning-systems-must-protect-everyone-within-five-years>).

Система раннего предупреждения о паводках и наводнениях рассматривается как компонент СРП о многих опасных явлениях. Согласно последним исследованиям, выполненным в рамках постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию ВМО, наибольший эффект от таких систем достигается при так называемом рассмотрении данных систем как сквозных систем, то есть когда система охватывает все компоненты процесса выпуска предупреждений, их доведения до пользователей и дальнейшие действия по принятию решений и реагированию на угрозу формирования опасных паводков. Схематично СРП о паводках и наводнениях включает в себя компоненты по сбору оперативных данных, моделированию и прогнозу, выпуску штормовых предупреждений, поддержке принятия решений и реагированию (рис. 5.2) [141].



Рис. 5.2. Компоненты систем раннего предупреждения о наводнениях [160].

Важно отметить наличие обратной связи в системах сквозного типа, которая постоянно приводит к обзору системы и ее улучшению. Таким образом, можно говорить также о системе замкнутого цикла применительно к сквозным системам раннего предупреждения об угрозе формирования паводков и наводнений на реках.

Сквозную систему раннего предупреждения о паводках и наводнениях можно условно разделить на две функциональные составляющие:

1) непосредственно процесс подготовки и выпуска прогнозов характеристик паводков и выпуск штормовых предупреждений, куда входят процессы сбора оперативных данных, моделирование, прогнозирование и непосредственно выпуск и доведение штормовых предупреждений – то есть непосредственно система гидрологических прогнозов;

2) принятие решений и реагирование на угрозу развития паводковой обстановки.

Как правило, за первую часть отвечает Национальная гидрометеорологическая служба, на территории Российской Федерации за систему гидрологического прогнозирования отвечает Росгидромет (в лице УГМС Росгидромета и ФГБУ «Гидрометцентр России»); за вторую часть – Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России). При этом в процессе поддержки принятия решений принимает участие и Росгидромет.

В данной главе речь пойдет о первой части СРП как компоненты сквозных систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях, включающей в себя задачи получения и обработки исходной гидрометеорологической информации, моделирования, выпуска гидрологических прогнозов, подготовки, выпуска и доведения штормовых предупреждений до конечных пользователей.

Заблаговременность систем может быть совершенно разная: от сверхкраткосрочных прогнозов и предупреждений, например об угрозе формирования быстроразвивающегося паводка, до долгосрочных прогнозов и климатических проекций изменения водных ресурсов или определенной характеристики стока.

Как известно, ВМО является ведущей организацией ООН в области гидрометеорологии, основные задачи которой является международная координация и сотрудничество в области метеорологии, гидрологии, климата и окружающей среды. Членами ВМО являются Национальные гидрометеорологические службы. Основная задача ВМО – осуществление поддержки деятельности НГМС в области сбора и обмена гидрометеорологической информацией, развитие потенциала в области исследований для улучшения гидрометеорологического обслуживания потребителей. Одними из основных рабочих органов ВМО является две Технические комиссии – по инфраструктуре (ИНФКОМ) и по предоставлению

обслуживания (СЕРКОМ). В рамках СЕРКОМ существует постоянный комитет по гидрологическому обслуживанию (ПК-ГИД), состоящий из 20 членов, председателем которого является Ю.А. Симонов (ФГБУ «Гидрометцентр России»). Цель ПК-ГИД заключается в поддержке НГМС в области развития потенциала для обеспечения гидрологического обслуживания потребителей в плане паводков и наводнений, засух и маловодья, поддержки принятия решений в области водных ресурсов и т. д. (<https://community.wmo.int/activity-areas/sercom/sc-hyd>).

Одним из основных направлений работы ПК-ГИД является разработка нормативного материала, механизмов для оценки и усовершенствования потенциала в области СРП о паводках и наводнениях различного генезиса, в том числе быстроразвивающихся паводков, половодий, городских наводнений и т. д. В частности, в рамках создания Сообщества практиков по гидрологическому прогнозированию размещено Руководство по оценке существующей СРП о паводках и наводнениях НГМС [21], которое позволяет оценить все компоненты СРП – от сбора и обработки исходных данных и сопутствующей информации до применимости метеорологической продукции, гидрологических моделей, подсистемы визуализации прогностической продукции и доведению ее до конечных пользователей. Данное руководство внедрено в виде оценочного инструмента (таблицы формата excel), которое содержит различные вопросы о СРП, варианты ответов и, соответственно, оценки, позволяющие получить представления о том, какой компонент (подсистему) СРП необходимо улучшить для достижения наилучшего результата.

Другим примером улучшения потенциала для НГМС в плане развития СРП является такое направление деятельности ПК-ГИД, как Инициатива по прогнозированию паводков. Данная Инициатива включает в себя развитие и внедрение СРП ВМО, таких как Руководство по прогнозированию паводков или СРП по прибрежным наводнениям. Также последним видом деятельности является создание руководства по интеграции отдельных СРП в единую СРП о многих опасных явлениях (СРПМОЯ). В частности, на Второй сессии Технической комиссии СЕРКОМ в октябре 2022 года была рассмотрена концепция создания СРПМОЯ, разработанная совместно специалистами в области снижения риска бедствий и членами ПК-ГИД (Рекомендация 5.6(6) СЕРКОМ-2). В концепции рассмотрены основные положения о создании СРПМОЯ, в том числе технические компоненты, взаимосвязи между ними, вопросы управления такими системами, технической поддержки и т. д. Дальнейший этап будет включать написание руководства по разработке и внедрению СРПМОЯ на уровне НГМС при поддержке экспертов ВМО.

Безусловно, одной из важнейших инициатив ПК-ГИД в области СРП является разработка и ввод в эксплуатацию Сообщества практиков в области гидрологического прогнозирования

(<https://www.floodmanagement.info/e2e-ews-ff-community-of-practice-area>). Это представляет собой веб-страницу с различными материалами, которые позволят НГМС повысить их способности по прогнозированию паводков. В частности, в рамках Сообщества размещены рекомендуемые ПК-ГИД методы и модели, которые могут быть использованы в качестве основы для методики прогнозирования (рекомендуемые методы и модели имеют открытый код, доказали свою применимость в области оперативного прогнозирования, имеют руководство пользователя и т. д.). Также на странице размещены рекомендуемое программное обеспечение (т. н. платформы) для увязки потоков входной информации с гидрометеорологической наблюдательной сети с гидрологическими моделями и системой визуализации результатов прогнозирования. Другим видом продукции Сообщества являются многочисленные Руководства ВМО по разработке и внедрению методов гидрологического прогнозирования.

Работа с развитием системы руководства по быстроразвивающимся паводкам FFGS/WGC, в частности разработка Стратегии устойчивого функционирования и развития данной системы, является также одной из приоритетных задач комитета по гидрологическому обслуживанию. В рамках этой задачи происходит модернизация различных компонент программы FFGS/WGC, таких как, например, придание модульной структуры функциональной системы, разработка аналитической системы прогноза быстроразвивающихся паводков (AFFGS), в которой можно менять и встраивать различные части кода и подмодели, создание новой стратегии в области повышения потенциала НГМС, в том числе путем дополнительных обучающих курсов и т. д.

Таким образом можно резюмировать, что ПК-ГИД ВМО вносит существенный вклад в разработку концепции, а также непосредственно создание, внедрение и поддержку СРП о паводках и наводнениях для НГМС. Страны-члены ВМО в лице НГМС имели возможность оценить функционал сайта Сообщества практиков в области гидрологического прогнозирования и высоко оценивают доступные материалы. Данное Сообщество находится в постоянном развитии и пополнении материалами в области развития СРП о паводках и наводнениях.

Руководство по быстроразвивающимся паводкам

Одной из наиболее современных систем раннего предупреждения о прохождении паводков является система (руководство) по быстроразвивающимся паводкам с глобальным охватом (<https://public.wmo.int/en/projects/ffgs>) – Flash Flood Guidance System with Global Coverage (FFGS/WGC). Данная система была впервые внедрена в 2004 году, а начиная с 2007 года развивается как совместная программа Всемирной метеорологической организации в сотрудничестве с Центром

гидрологических исследований, Агентством США по международному развитию и Национальному управлению океанических и атмосферных исследований США/Национальная служба погоды. Система предоставляет руководство гидрологам-прогнозидам и синоптикам, необходимое для формулирования и выпуска своевременных штормовых предупреждений о формировании быстроразвивающихся паводков на небольших речных бассейнах [119]. Она была разработана и создана в Центре гидрологических исследований на основе результатов исследований быстроразвивающихся паводков, которые произошли в течение 90-х годов XX века. Важными техническими элементами FFGS/WGC являются разработка и использование спутниковых и радарных количественных оценок осадков (включая алгоритм поправки на погрешность измерений), конфигурация и реализация мезомасштабных моделей численного прогнозирования погоды для целей прогноза осадков с высоким разрешением, а также использование гидрологической модели формирования стока на водосборе для определения влажности почвы, прогноза быстроразвивающихся паводков и угрозы их формирования для бассейнов площадью не более 150–200 км² (в случае наличия входных данных высокого пространственного разрешения площадь бассейнов может составлять 20–75 км²). Помимо поля прогнозов осадков, система позволяет НМГС использовать прогноз синоптиков для внесения поправок во входные данные.

Система раннего предупреждения о быстроразвивающихся паводках FFGS/WGC имеет ряд взаимосвязанных компонентов (рис. 5.3). Основные компоненты включают сбор данных, передачу данных в прогностический центр НМГС, обеспечение качества и контроль качества данных, внедрение метеорологических моделей и гидрологических моделей, выпуск прогностической продукции и штормовых предупреждений об угрозе возникновения быстроразвивающихся паводков, распространение прогнозов и предупреждений пользователям.

В 2019 году была проведена оценка функционирования системы FFGS/WGC техническими экспертами Всемирной метеорологической организации – Ю.А. Симоновым (Российская Федерация), К. Барретом (США) и М.-У. Куирно (Аргентина). На основе выводов независимой оценки [93], а также основных положений глобальной конференции по усовершенствованию программы FFGS, под руководством постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию ВМО разработана Концепция устойчивого развития руководства по прогнозированию быстроразвивающихся паводков с глобальным охватом FFGS/WGC, утвержденная Всемирным метеорологическим конгрессом в октябре 2021 года [159]. В соответствии с данной Концепцией предлагается ряд мероприятий по дальнейшему развитию и усовершенствованию данной

программы, в том числе по созданию новой модульной архитектуры системы, которая позволит пользователям (специалистам НГМС) вносить изменения или дополнения к компонентам системы.



Рис. 5.3. Схема компонентов системы FFGS/WGC.

Система раннего предупреждения о наводнениях в прибрежной зоне

Наводнения в прибрежной зоне происходят в сочетании деятельности штормовых нагонов, волнения и речных наводнений. Они приводят к огромному количеству – не менее 2.6 млн человек по оценкам ООН утонули в связи с такого рода наводнениями за последние 200 лет [106]. В связи с этим внедрение СРП о наводнениях в прибрежной зоне является крайне актуальной задачей. Совместная Техническая комиссия по океанографии и морской метеорологии и Комиссия ВМО по гидрологии решили работать вместе, чтобы поддержать НГМС в части развития таких систем. В 2009 году был инициирован Демонстрационный проект прогнозирования прибрежных наводнений [163] для усиления безопасности прибрежных сообществ за счет внедрения системы прогнозирования и предупреждения на национальном и региональном масштабе.

Основное внимание в рамках данной СРП уделялось раннему предупреждению в прибрежных зонах и речных бассейнах, подверженных влиянию тропических циклонов и штормовым нагонам, сильным

воздействиям волн, приливов и паводков на реках. Демонстрационный проект предназначен для поддержки НГМС в разработке и оперативном использовании прогностической продукции. Это потребовало обширной подготовки по использованию этой продукции при различных гидрометеорологических ситуациях риска. Комитет управления Демонстрационным проектом включал в себя группу экспертов в области гидрологии, морской метеорологии и океанографии под председательством Ю.А. Симонова (Российская Федерация) и В. Свейла (Канада).

В 2018 году был выполнен независимый обзор Демонстрационного проекта [93], в результате которого получена тщательная оценка инновационной концепции СРП с различными выводами и рекомендациями. Обзор подтвердил, что подпроекты успешно продемонстрировали способность СРП эффективно поддерживать НГМС в выпуске прогнозов и предупреждений о прибрежных затоплениях. Было бы также полезно расширить внедрение СРП в другие развивающиеся страны. В ответ на рекомендации выполненного обзора в 2022 году эксперты ВМО Ю.А. Симонов и Р. Кантерфорд разработали Руководство по системам раннего предупреждения наводнений в прибрежной зоне [125]. В основе структуры Руководства приводятся десять этапов создания системы раннего предупреждения о наводнениях в прибрежной зоне:

1. Проведение оценки риска на национальном уровне
2. Проведение встречи всех задействованных институтов, включая пользователей продукции и доноров.
3. Проведение технической оценки существующих компонент системы раннего предупреждения.
4. Проверка подсистемы доведения штормовых предупреждений о прибрежных наводнениях до пользователей.
5. Привлечение организаций-доноров.
6. Создание управляющей группы проекта, включая установление связей с региональными центрами продукции ВМО.
7. Укрепление всех компонент системы раннего предупреждения с учетом ранее выработанного плана внедрения проекта.
8. Проверка системы раннего предупреждения в квазиоперативном режиме.
9. Обеспечение обучения всем компонентам СРП.
10. Проведение оценки функционирования СРП в оперативном режиме.

По каждому вышеперечисленному этапу внедрения в Руководстве представлена детальная информация. Технически же СРП о наводнениях в прибрежной зоне основана на функционировании ряда моделей, в том числе численной модели атмосферы, модели нагонов и волнения, гидрологической модели формирования стока, а также модели трансформации паводка по руслу реки с учетом динамической

связи последней с моделью нагонов. Данная цепочка последовательных действий и взаимосвязи между компонентами расчетной системы показана на рис. 5.4 [125].

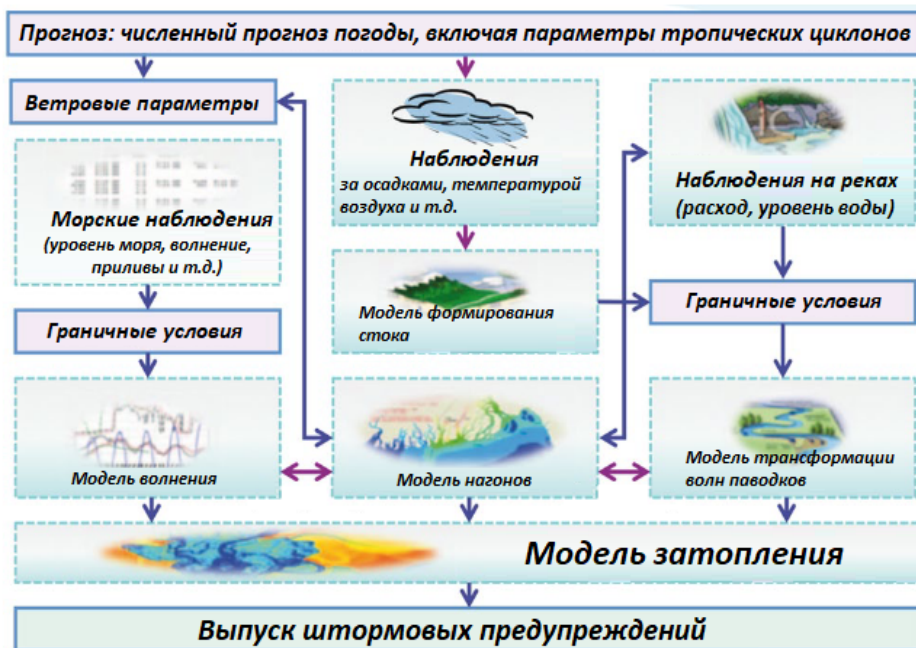


Рис. 5.4. Диаграмма расчетных блоков модели наводнений в прибрежной зоне.

Выходной продукцией СРП о прибрежных наводнениях являются карты затоплений с различной вероятностью превышения. На основе данной продукции специалист НГМС принимает решение о выпуске штормового предупреждения о наводнении в прибрежной зоне.

5.2. Структура систем раннего предупреждения

Современные системы раннего предупреждения должны быть основаны на последних достижениях в сфере информационных технологий. Они должны включать системы управления базами данных, программные средства автоматизации методик прогнозирования паводков и технологии доведения и визуализации прогнозов и предупреждений. Кроме того, СРП должна иметь широкие функциональные возможности по систематизации типов информационной продукции, автоматической поддержке электронных каталогов базы данных, ведению метаданных

с подробным описанием каталогов и т. д. В ней должна быть реализована высокая степень безопасности на трех уровнях: создание учетных записей пользователей (логин и пароль) на уровне базы данных, веб-сервисов и веб-приложений; дополнительная защита данным обеспечивается через веб-адаптер веб-сервера. Как правило, базовая технология СРП включает три основных компонента:

1. Информационная основа, предназначенная для хранения, систематизации, управления, поддержки и ведения массивов оперативной и архивной гидрометеорологической информации (наблюдений и прогнозов).

2. Выпуск прогнозов расхода (уровня) воды в период прохождения паводков, включая автоматизацию прогностических методик (гидрологическая модель, ее адаптация, оптимизация параметров, коррекция прогноза и т. д.).

3. Доведение до пользователей на основе ГИС-веб-технологий подготовки фактической и прогностической информационно-аналитической информации в графическом виде и доведения до пользователей с помощью веб-приложения.

Общая структурная схема модернизированной технологии СРП подготовки и доведения до пользователей выходной продукции представлена на рисунке 5.5. Следует отметить, что отмеченная на данном рисунке схема лишь в общем виде показывает процедуру составления и выпуска прогнозов и их доведения до конечных пользователей. Каждый из представленных блоков состоит из ряда процессов, например: подготовка данных начинается с их приема, декодировки, первичного контроля, усвоения, обработки в требуемый временной вид и формат для организации входа в гидрологические модели; подготовка метеорологического прогноза, формирования прогностического ансамбля (в случае, если метеорологический прогноз доступен в ансамблевой форме) и т. д. Если принять во внимание уточнение прогноза по вновь поступившим данным или последнему метеорологическому прогнозу, то рассматриваемую схему необходимо выполнить еще раз. Основные этапы процесса составления выпуска краткосрочного гидрологического прогноза показаны на рисунке 5.5.

Информационная основа

Информационной основой для выпуска прогнозов и визуализации прогностической продукции в рамках СРП и последующего ее доведения до конечных пользователей являются оперативные данные наблюдений (гидрология, синоптика, снегомерные съемки, агрометеорология) и прогнозов (метеорологические прогнозы, гидрологические прогнозы). Соответственно, в технологии выпуска прогнозов важную роль играют

аспекты, связанные с хранением и обработкой больших объемов оперативной информации. Значимыми являются вопросы, связанные с надежностью и удобством различных процедур, в частности их обновления, извлечения и т. д. В отечественной практике использования баз данных основные моменты регламентируются ГОСТ [43]. Кроме того, существует международный стандарт ИСО/МЭК ТО 10032:2003 «Информационная технология. Эталонная модель управления данными», разработанный Международной организацией по стандартизации (ИСО).

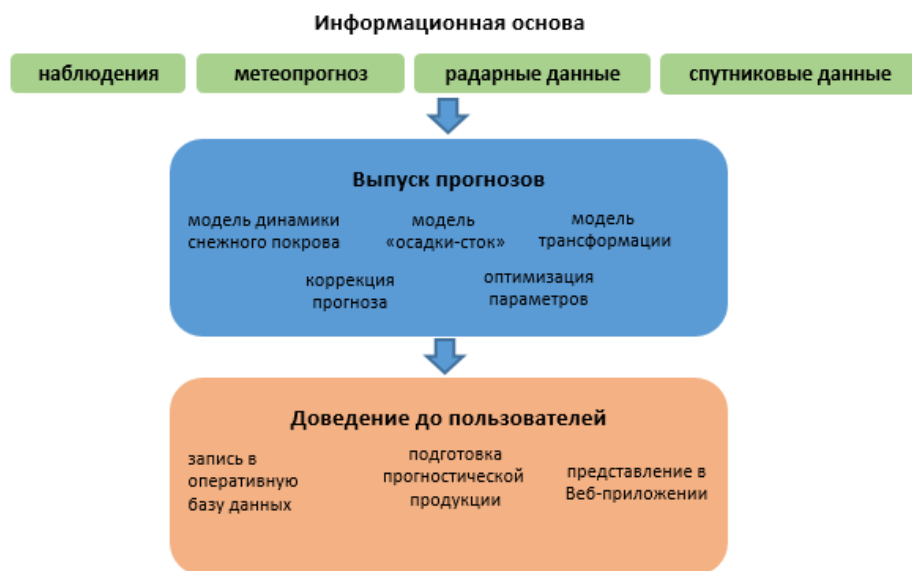


Рис. 5.5. Основные этапы процесса составления выпуска краткосрочного гидрологического прогноза.

Ядром информационной основы является база данных (БД), которая помимо непосредственно данных должна быть снабжена программными средствами ее управления (размещения данных, архивирования, перезаписи и т. д.), поэтому чаще всего БД такого рода называют СУБД. Тип БД (например, реляционная, сетевая, иерархическая) необходимо определить из требований, предъявляемых к ней со стороны подсистем вычислений и визуализации, а также исходя из типа и набора самих гидрометеорологических данных. Для обеспечения максимального эффекта от автоматизации СРП рекомендуется использование БД реляционного типа (связанные таблицы по определенному общему признаку под управлением языка программирования *SQL*) из-за ее совместимости с ГИС-системами и облегченным доступом для программы обработки

информации. В случае создания оперативной гидрометеорологической БД таким общим полем является индекс пункта наблюдений (поста или станции), уникальной характеристики для конкретного пункта наблюдений. Это позволяет установить на основе общих значений связь, или соединение между оперативной таблицей и соответствующим слоем пространственных данных, содержащим значения кода (индекса) и пространственные координаты станций и постов. В качестве иллюстрации на рис. 5.6 для ГИС «Волга» (раздел 5.3) дано графическое представление связей в оперативной реляционной БД между таблицами с оперативными данными гидрологических наблюдений (слева вверху), данными о ледовых явлениях (слева внизу) и таблицей со справочными данными (справа) на основе значений полей, содержащих индексы гидрологических постов. Таким образом, оперативно поступающие и рассчитываемые данные получают пространственную привязку через координаты пункта наблюдений и в дальнейшем могут быть отображены в картографической форме как в настольной версии ГИС (например, в *ArcGIS Desktop* или *QGIS*), так и с применением серверных ГИС-веб-технологий.

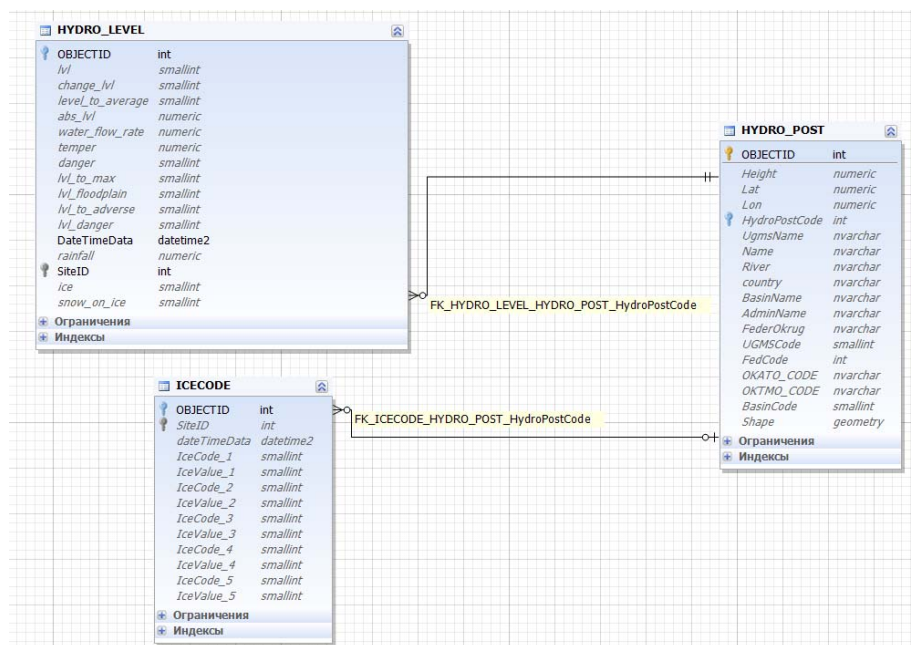


Рис. 5.6. Графическое представление связей в оперативной реляционной базе данных.

В настоящий момент существует ряд программных продуктов, позволяющих создать базу данных и обеспечить автоматизацию различных процессов ее управления (сохранение, архивация, доступ к данным, сортировка и т. д.): *MSSQL*, *Oracle*, *MySQL*, *PostgreSQL* и другие. Из перечисленных программных продуктов *MSSQL* и *Oracle* являются коммерческим программным обеспечением, остальные – в открытом доступе. В рамках создания и внедрения БД должно содержать два вида информации:

- оперативно обновляемая информация (данные наблюдений и прогнозов в узлах сетки и пунктах наблюдений – гидрологических постах, метеорологических станциях, агрометеорологических станциях и снегомерных маршрутах);

- атрибутивная информация о пунктах сети гидрометеорологических наблюдений в рассматриваемом бассейне – так называемые метаданные наблюдательной сети (код пункта наблюдений, название, отметка нуля графика поста и т. д.). Запись значений гидрометеорологических элементов в БД может быть осуществлена с помощью программных средств, созданных с использованием языка программирования *Python* (с использованием модуля *pymssql* в случае использования программных средств *MSSQL*), или *C++* с соответствующей библиотекой, позволяющей редактирование таблиц баз данных *MSSQL*. Такие программные средства, запускаемые по расписанию, будут способствовать автоматизированному обновлению информации в реляционной базы данных.

Функционал модуля *pymssql* позволяет с помощью программ-скриптов, составленных на языке *Python*, осуществлять доступ к БД под управлением *MS SQL Server* и производить требуемые операции над таблицами БД (выборка данных, запись данных в таблицу, обновление данных) с использованием синтаксиса и выражений языка *T-SQL*. В свою очередь, запуск *Python*-программ осуществляется в автоматизированном режиме по расписанию, что служит решением задачи автоматизированного пополнения реляционной базы гидрометеорологических данных для бассейна рассматриваемой реки. Использование языка программирования *Python* также удобно в связи с его широкой интеграцией в геоинформационные среды (например, в среду *ArcGIS*), в связке с которой предполагается работа систем управления базой данных, а также в целом широкого распространения данного языка в научной и оперативной деятельности НГМС.

Необходимо также разработать отдельные *Python*-программы для расчетов ряда гидрометеорологических характеристик, не измеряемых непосредственно. С помощью подобных программ автоматически производится выборка исходных данных для расчетов из таблиц БД, расчет «на лету» и запись в требуемую целевую оперативную таблицу.

Например, класс опасности фактической гидрологической обстановки на гидрологических постах определяется в зависимости от положения наблюдаемого уровня воды на посту относительно его критических отметок (выход воды на пойму, отметки неблагоприятного и опасного явлений). Соответственно, программа расчета класса опасности каждый раз за текущую дату и срок наблюдений выбирает для каждого поста в бассейне реки значение уровня воды из оперативной таблицы, значения критических отметок из «справочной» таблицы; выполняет математическое сравнение этих величин; в зависимости от результата устанавливает значение класса опасности (0 – отсутствуют критерии опасности; 2 – нет затоплений; 3 – превышена отметка поймы; 4 – превышена отметка НЯ; 5 – превышена отметка ОЯ); вносит запись в таблицу с данными оперативных гидрологических наблюдений на реках. Таким образом, комплекс специально разработанных программных средств на языке *Python* с использованием функционала модуля *pymssql* служит эффективным решением задачи автоматизированного пополнения реляционных БД под управлением *MS SQL* оперативными данными по бассейну рассматриваемой реки.

Программные средства управления базой данных условно можно подразделить на несколько категорий.

1) прикладные средства, создаваемые разработчиками приложений баз данных при реализации своих предметных областей;

2) средства администрирования БД, которые, как правило, входят в комплект дистрибутива каждой конкретной системы управления базами данных, например, для *MS SQL Server* это могут быть: проприетарная клиентская среда разработки с использованием графического интерфейса пользователя – *SSMS*; проприетарный язык программирования *TransactSQL (T-SQL)*, и другие программные средства.

3) средства, входящие в состав программных средств третьих фирм, в частности, такими высокоуровневыми средствами могут выступать:

– клиентские среды разработки на базе графического пользовательского интерфейса, например *DbForge Studio*;

– языки и среды программирования, например *Python*;

– интегрированные дистрибутивы, например *Anaconda*;

– ГИС-оболочки для работы с пространственными типами данных, например *ArcGIS*.

– средства, входящие в состав нижележащего программного обеспечения, которым обычно является уровень операционной системы (так называемые «системные средства»);

– средства сетевого администрирования.

Автоматизация работы приложений системы управления БД в рамках СРП может осуществляться несколькими способами: либо сценарий

детерминированного запуска на локальном сервере, либо сценарий детерминированного запуска на удаленном сервере; либо же с использованием стандартного планировщика заданий операционной системы *Windows* (в случае использования данной операционной системы).

Получение и выпуск прогноза

В последние годы в связи с модернизацией наблюдательной сети и появлением доступа к данным учащенных наблюдений, а также площадных оценок поля осадков с радарных данных и метеорологических прогнозов, произошел значительный рост объема исходной гидрометеорологической информации – увеличилась как частота наблюдений, так и объем передаваемой информации. Качественный скачок технического оснащения положительно повлиял на скорость расчета и детализацию прогностической метеорологической информации – в настоящий момент гидрологам-прогнозидам доступны прогностические поля метеорологических элементов в сетке с пространственным шагом до 500 м, рассчитываемые до четырех раз в сутки. Кроме того, как правило, доступны прогнозы нескольких прогностических центров (а также ансамблевые прогнозы), что позволяет формировать ансамбль метеорологического входа в методики гидрологических прогнозов. Рост технического и программного оснащения гидрометеорологических служб привел к более высоким требованиям, предъявляемым к качеству и частоте выпуска краткосрочных прогнозов – в настоящее время ведущие гидрометеорологические службы мира осуществляют круглосуточный выпуск краткосрочных прогнозов, основанных на усвоении всего массива имеющейся исходной информации (наблюдения, данные метеорологических радаров, метеорологический прогноз) несколько раз в сутки. После каждого выпуска прогнозов производится глубокий анализ прогностической информации с построением финальных прогностических продуктов картографического, графического и текстового формата.

В связи с вышесказанным, в современных условиях осуществлять составление и выпуск краткосрочных гидрологических прогнозов в ручном режиме за редким исключением не представляется возможным. Разработка и внедрение в оперативную деятельность автоматизированного выпуска краткосрочных прогнозов является адекватным ответом на растущие требования к точности, надежности краткосрочных прогнозов паводкового стока, а также составу и виду прогностической продукции.

Вследствие этого автоматизация процесса расчета и выпуска прогнозов расходов (уровней) воды является одной из ключевых задач оперативного прогноза паводков и, соответственно, является основной компонентой СРП о паводках и наводнениях [23, 60, 82, 123, 137].

Автоматизация процесса выпуска прогноза, как правило, заключается в подготовке исходной гидрометеорологической информации для методики прогноза путем обращения к оперативным базам данных и их последующей обработке, непосредственного запуска методики или модели, обработки выходного результата, запуска методики коррекции прогноза (в случае наличия таковой), а также запись результата прогноза в базу данных для ее последующей визуализации и доведения до пользователя.

Программная реализация процесса автоматизации расчета и выпуска гидрологического прогноза зависит от многих факторов, в том числе от оперативной системы вычислительных средств, формы реализации методики прогнозирования, вида программных средств реализации метода или модели и т. д. Например, для выпуска краткосрочных прогнозов расходов (уровней) воды для рек бассейна Камы выше Камского водохранилища использована модель HBV-96, а также модели трансформации расходов воды на участках рек [82], реализованные на языке программирования *Python* (версия 3.4). Программное обеспечение, автоматизирующее выпуск краткосрочных прогнозов с помощью модели HBV-96 *runhmv.py* сформировано с использованием языка программирования *Python 3.4*, а также его внешних модулей. При запуске программы осуществляется поиск исходных файлов с необходимой гидрометеорологической информацией (как наблюдаемой, так и прогностической), формирование входного файла для гидрологической модели, запуск модели, обработка финального результата прогнозирования.

Одним из ключевых этапов автоматизации расчета выпуска прогноза является подготовка входной гидрометеорологической информации, заключающаяся в загрузке данных из базы данных за определенный период времени (наблюдения и прогноз), обработке данных для получения требуемого вида для организации входа в гидрологическую модель. Реализация такого этапа зависит от типа используемой гидрологической модели и, соответственно, от типа требуемой исходной гидрометеорологической информации. Например, для краткосрочных прогнозов при использовании концептуальной модели формирования стока на водосборе, как правило, требуются данные о температуре воздуха, осадках за несколько предшествующих суток, осредненных по расчетному речному водосбору, а также прогноз температуры воздуха и осадков на несколько суток вперед.

Для осуществления коррекции прогноза расхода (уровня) воды требуются также данные наблюдений и предшествующих прогнозов для анализа ошибок прогнозов на предшествующих временных интервалах. В случае долгосрочного прогноза максимального уровня весеннего половодья требуется выборка информации по снегомерным маршрутам, их обработка и осреднение в рамках расчетных водосборов исследуемого

речного бассейна, а также обработка информации по влажности почвы и глубине ее промерзания. При прочих равных условиях подготовка исходной информации для долгосрочного прогноза является более трудоемкой, чем для краткосрочного-среднесрочного прогноза.

Заслуживает внимания подготовка информации в случае отсутствия данных наблюдений или метеорологических прогнозов. В таких случаях применяются различные методы и алгоритмы заполнения пропусков в случае пропуска данных наблюдений и метеорологических прогнозов, в частности при недоступности выхода определенной метеорологической модели следует использовать выходы другой метеорологической модели или прогнозы с предыдущего срока выпуска метеорологической модели. В случае отсутствия данных гидрологических наблюдений иногда используют модельные расчеты для данного временного шага, выполненные с использованием фактической метеорологической информации. В случае пропуска метеорологических данных наблюдений допускается на данный временной интервал в качестве входа задать значения последнего метеорологического прогноза искомого метеорологического элемента. Основное правило должно заключаться в том, что на вход гидрологической модели должна подаваться информация без пропусков в данных.

После подготовки исходной информации и приведения ее в требуемый формат следует автоматизировать запуск гидрологической модели в требуемом режиме (оперативный выпуск прогнозов) с указанием, где считывать переменные состояния модели, соответствующие дате и времени выпуска прогноза, а также где расположена информация о параметрах и константах модели для расчетного речного водосбора. После непосредственного модельного расчета прогностического значения необходимо произвести его проверку и сохранение по требуемому формату для дальнейшей работы программы коррекции прогноза и сохранения результатов в базу данных.

Важным аспектом процесса автоматизации расчета гидрологического прогноза является наличие выдачи промежуточных результатов и их запись в текстовый файл, к которому при необходимости можно обратиться для выяснения причин некорректного расчета величин. Также важным является наличие специально программы, «следящей» за ходом выполнения расчетов и за результатом и выдающей статистическую информацию о том, для скольких гидрологических постов (водосборов, элементарных элементов водосбора) из общего количества произошел расчет и выдача данной информации оператору системы, производящему ее обслуживание.

Доведение продукции до пользователей

Для эффективного оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией СРП должна содержать блок

подготовки, визуализации выходной прогностической продукции и доведения ее до конечных пользователей. Рекомендуется использовать ГИС- и веб-технологии для реализации данного блока, что позволяет визуализировать и интегрировать в единой информационной среде (сети Internet) географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую геопространственную информацию. Это показывает международная практика гидрологического прогнозирования, в том числе в части реализации Инициативы по прогнозированию паводков ВМО [137], опыт ведущих зарубежных гидрометеорологических служб в области гидрологического мониторинга и прогнозирования, а также опыт ФГБУ «Гидрометцентр России» по разработке и внедрению автоматизированных бассейновых систем гидрологического мониторинга и прогнозирования для бассейнов крупных рек (ГИС «Амур», ГИС «Волга» и другие системы). Именно в части доведения продукции до пользователей с помощью ГИС- и веб-технологий по итогам международной конференции пользователей ESRI (Сан-Диего, Калифорния, США) система ГИС «Амур» [85], реализованная в ФГБУ «Гидрометцентр России», была признана «Проектом 2015 года», а Гидрометцентр России и НИЦ «Планета» (организации-разработчики системы) были удостоены высшей награды за особые достижения в области применения геоинформационных технологий – Special Achievement in GIS (SAG Award 2015). Программные средства доведения продукции СРП до пользователей включает в себя две основные компоненты:

- ГИС-компонент:
 - управление ГИС-серверами и автоматизированными рабочими местами (АРМ), предназначенными для расчетов и прогнозов характеристик паводков, а также подготовки фактической и прогностической информации (серверные и корпоративные ГИС);
 - веб-компонент: взаимодействие с пользователями (веб-сервер с веб-приложением).

Для создания компоненты доведения прогнозов до пользователей СРП рекомендуется выбрать платформу промышленного образца в серверном и настольном исполнении. Компонент подсистемы должен состоять минимум из двух ГИС-серверов, объединенных в кластер, и трех автоматизированных рабочих мест (АРМ). АРМы предназначены для наполнения и коррекции данных общего характера о бассейне рассматриваемой реки или района (например, сведений о гидрологических постах, топографической и гидрографической информации и др.), наполнения базы данных фактической информацией об уровнях и расходах воды на гидрологических постах, вычисления прогнозов уровня воды на гидрологических постах. АРМы гидролога должны быть оснащены ПО ГИС настольного исполнения с дополнительными модулями усовершенствованной геообработки, например *ArcGIS for Desktop* и модулями *Spatial*

Analyst, *Geostatistical Analyst*, *3D Analyst* и др. в случае использования ГИС от ESRI. Они могут быть объединены в корпоративную сеть и иметь управление с ГИС-сервера. Основная функция ГИС-сервера заключается в создании веб-сервисов гидрологической, метеорологической, синоптической фактической и прогностической информации на основе упорядоченных данных, хранящихся в БД, а также оптимизация и управление этими сервисами. Кроме того, ГИС-серверы отвечают за разграничение доступа пользователей к данным. С целью равномерного распределения нагрузки между ГИС-серверами при одновременном обращении большого количества пользователей (около 200 пользователей), а также поддержания бесперебойной работы подсистемы при выходе одного из серверов из строя, ГИС-серверы рекомендуется объединить в кластер.

Компонент взаимодействия с пользователями (веб-компонент) рекомендуется выполнять в виде веб-приложения, которое можно разместить в одном из оперативно-прогностических подразделений исследуемого бассейна реки. Основная функция компонента состоит в объединении сервисов, действующих в разных оперативно-прогностических подразделениях Национальной гидрометеорологической службы на основе графического интерфейса, с помощью которого пользователям предоставляется доступ для визуализации и анализа всей имеющейся прогностической информации. Ниже представлены основные возможности веб-приложения, доступные для пользователей в режиме реального времени, которые рекомендуется предусмотреть в рамках разработки блока визуализации и доведения до пользователей продукции СРП о паводках и наводнениях.

В веб-приложении должна быть реализована возможность просмотра всей наблюдающейся или спрогнозированной паводковой информации – уровня воды, тенденции уровня воды, превышения критических отметок, класса опасности гидрологической обстановки, площади затоплений, влажности почвы и других гидрометеорологических характеристик (рис. 5.3–5.6).

Помимо просмотра рекомендуется предусмотреть возможность доступа к информации с учетом разнообразных выборок (по времени, по пространству и другим критериям), которую можно легко экспортировать для ее последующего анализа в сторонних приложениях. Помимо представления оперативной гидрометеорологической информации веб-приложение должно позволять пользователю выбирать картографическую основу (например, картографическую подложку *ArcGIS Online*, мультимасштабную карту *Росреестра*, карту *Bing Maps* и др.), на основе которой можно визуализировать различные виды гидрометеорологической информации.

Интерфейс должен позволять отображать на картографической основе все гидрологические посты, метеорологические станции, ГЭС и другие объекты, а также получать фактические и прогностические значения с этих постов, представленные в виде графиков и таблиц, оформлять выходные результаты в электронном и печатном видах. Интерфейс должен также предусматривать комплексирование различных видов гидрологической, метеорологической, синоптической, спутниковой информации, представленной в векторном и растровом видах. При комплексировании может быть разработан и использован инструментальный «шторка», «уровень прозрачности», «уровень контрастности» и др.

Графический интерфейс веб-компоненты подсистемы рекомендуется разрабатывать на языке программирования *JavaScript* с использованием технологии *API* для используемого программного обеспечения ГИС, что даст возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа-носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в Интернет, без установки дополнительных программ. Компьютерный код приложения может быть написан с использованием открытого программного кода, например *JavaScript Viewer for ArcGIS* и *Hard Cider* с рядом уже реализованных модулей и функций. В результате веб-приложение будет работать во всех наиболее популярных программах для просмотра интернет-страниц (браузерах): Internet Explorer, Mozilla Firefox, Google Chrome, Yandex, Opera и др. Разработанное таким образом веб-приложение позволит пользователям в кратчайшие сроки получить доступ ко всему массиву гидрометеорологической информации и таким образом сформировать впечатление о складывающейся и прогностической гидрологической обстановке в рамках системы раннего предупреждения. Функционал приложения позволит провести анализ информации, ее комплексирование для формирования выходной продукции в текстовом, картографическом, графическом видах.

5.3. Системы раннего предупреждения Гидрометцентра России

В настоящее время СРП о наводнениях является атрибутом любой развитой НГМС, например [96, 120, 137]. Важнейшей задачей на современном этапе развития системы гидрологических прогнозов Росгидромета является создание эффективной и надежной СРП о паводках и наводнениях на территории крупных речных бассейнов с целью обеспечения потребителей качественной, своевременной и доступной информацией о сложившихся и ожидаемых гидрологических условиях. В последние годы произошел качественный скачок в информационном, научном и техническом обеспечении гидрологических прогнозов – стали

доступны данные учащенных наблюдений, площадные оценки осадков, детальные метеорологические прогнозы. Также используются усовершенствованные методики прогнозирования, основанные на применении математических моделей формирования стока на водосборе; появились новые программные средства представления прогнозов с использованием ГИС-технологий. В связи с этим выпуск гидрологических прогнозов в оперативном режиме представляется крайне сложной в технологическом плане задачей, которую возможно сделать более эффективной и надежной с помощью внедрения автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в последние годы ведется активная работа по разработке, внедрению и дальнейшей поддержке автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов для крупных речных бассейнов страны. Разработка выполняется с учетом рекомендаций Всемирной метеорологической организации, а также опыта разработки подобных систем в ведущих зарубежных национальных гидрометеорологических службах, в том числе США, Франции, Великобритании, Швеции, Польши и других стран.

Системы краткосрочных и среднесрочных прогнозов уровней и расходов воды Гидрометцентра России

В главах 2 и 3 настоящей монографии рассмотрены методики краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов (уровней) воды на реках Российской Федерации, разработанные в ФГБУ «Гидрометцентр России» в период с 2019 по 2022 г. и основанные на методах экстраполяции гидрографа, модели формирования стока НВУ-96, методе коррекции прогнозов, а также гидрометеорологических наблюдениях и метеорологической прогностической информации численных моделей атмосферы, в первую очередь COSMO-Ru [11, 12, 14, 15, 23, 96, 98, 75]. Система реализована с использованием новейших технологий в области проектирования баз гидрометеорологических данных, автоматизации выпуска прогнозов расходов (уровней) воды и визуализации с помощью ГИС-веб-технологий. При этом использовался весь ранее накопленный опыт создания таких систем в Гидрометцентре России, в том числе при разработке систем раннего предупреждения ГИС «Амур» и ГИС «Волга» [85], описание которых представлено ниже в данном разделе. В частности, для проектирования баз данных использовались средства *PostgreSQL*, находящиеся в открытом доступе и позволяющие создать связанную структуру необходимых для методики гидрометеорологических данных. Вычислительная часть системы, то есть автоматизация расчета методик, выполнена средствами языка программирования *Python* (версия 3.4). Часть доведения прогностической продукции до пользователей создана с использованием серверной версии *ArcGIS*, а также программных средств программирования веб-приложений.

В рамках системы в автоматизированном режиме на ежедневной основе производится выпуск расходов (уровней) воды на гидрологических постах рек Российской Федерации с заблаговременностью от 1 до 10 суток (см. главы 2 и 3). Визуализация прогноза осуществляется в рамках веб-приложения (рис. 5.6), где указывается прогноз уровня воды в см, прогноз изменения уровня воды в см относительно даты выпуска прогноза, а также прогноз гидрологической обстановки на основе отношения уровня воды к критическим отметкам (отметка поймы, неблагоприятного и опасного явлений). Помимо точечной информации также в веб-приложении есть графический тип представления продукции для каждого гидрологического поста. Данная система в настоящий момент проходит оперативные испытания и планируется к внедрению в 2023 году. Основная цель системы – предоставление прогностической продукции для поддержки принятия решений гидрологом-прогнозистом для выпуска официального прогноза и, возможно, штормового оповещения об опасном развитии паводковой обстановки на реках. Пример системы среднесрочных прогнозов уровней и расходов воды ФГБУ «Гидрометцентр России» представлен на рис. 5.7.

Система раннего предупреждения ГИС «Амур»

В рамках технического проекта восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне р. Амур после катастрофического паводка на реке летом-осенью 2013 г. [85] специалистами Гидрометцентра России и НИЦ «Планета» была разработана система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях ГИС «Амур» [12, 15, 85]. Данная система состоит из трех крупных подсистем: информационного обеспечения, расчета и прогнозирования, подготовки и доведения выходной прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей. Подобная структура системы прогнозирования успешно зарекомендовала себя в практике оперативного гидрологического прогнозирования зарубежных гидрометеорологических служб. На протяжении последних нескольких лет она также используется в Гидрометцентре России для рек бассейна Кубани и Черноморского побережья Кавказа [11, 14].

Информационная подсистема состоит из системы управления бассейновой базой гидрометеорологических данных, разработанной в Гидрометцентре России, и функционирующей в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации АСООИ Гидрометцентра России [47]. В режиме реального времени в базу данных поступает большой объем гидрометеорологической информации с сети наблюдений Росгидромета, прогностические поля метеорологических величин (рассчитываемых в Гидрометцентре России, а также поступающих по сети глобального обмена данными).

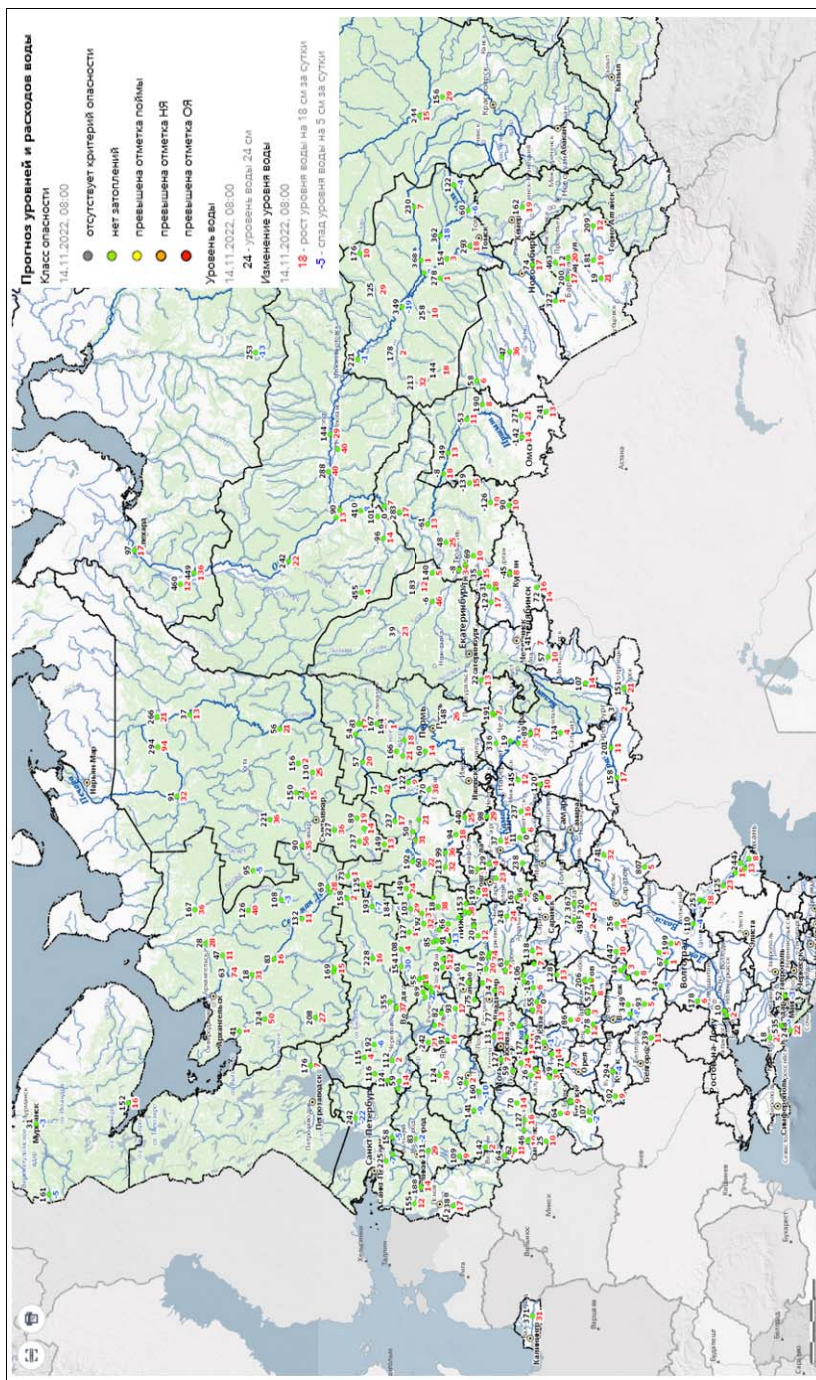


Рис. 5.7. Пример системы среднесрочных прогнозов уровней и расходов воды ФГБУ «Гидрометцентр России».

Информационная подсистема является основой для расчета и выпуска гидрологических прогнозов, а также для последующей визуализации данных гидрометеорологического мониторинга и прогнозирования. Вычислительным ядром системы ГИС «Амур» является подсистема гидрологических расчетов и прогнозов. Для основного русла рек Амур и Зeya реализована методика краткосрочного прогноза среднесуточных уровней воды с заблаговременностью до 6 суток [15]. Данная методика основана на использовании метода соответственных уровней с переменным временем добегаания. Для краткосрочного прогноза суточного объема притока воды к водохранилищу Зейской ГЭС разработана и внедрена методика прогноза, основанная на использовании математической модели формирования стока на водосборе водохранилища [12]. Функционирование подсистемы гидрологических расчетов и прогнозов обеспечивается постоянным взаимодействием с информационной подсистемой – требуемые исходные данные для гидрологических прогнозов отбираются из оперативной бассейновой базы гидрометеорологических данных. В качестве входной информации при выпуске прогнозов используются данные наблюдений на сети гидрологических постов и метеорологических станций, а также метеорологические прогнозы четырех метеорологических моделей: COSMO-Ru (Гидрометцентр России), JMA (Японское метеорологическое агентство), NCEP (Национальный центр по прогнозированию окружающей среды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании). Заблаговременность прогноза суточного притока воды в водохранилище составляет до 4 суток.

Подсистема СПД доведения прогнозов до пользователей реализована на основе ГИС- и веб-технологий, что позволяет визуализировать и интегрировать в единой информационной среде (сети Интернет) географическую, гидрологическую, метеорологическую, синоптическую, спутниковую информацию. Разработанная подсистема является территориально распределенной. Подготовка гидрометеорологической продукции, включая расчеты и прогнозы, осуществляется в Гидрометцентре России, прием и обработка спутниковых данных производится в Дальневосточном центре НИЦ «Планета», сбор и обработка информации с зарубежных спутников, поступающей по системе международного обмена EARS (EUMETSAT Advanced Retransmission Service), выполняются в Европейском центре НИЦ «Планета». Сибирский центр НИЦ «Планета» используется как резервный, когда по каким-либо причинам спутниковые данные не могут быть приняты Дальневосточным центром.

Подсистема подготовки и доведения выходной продукции до пользователей имеет широкие функциональные возможности по систематизации типов информационной продукции, автоматической поддержке электронных каталогов БД, ведению метаданных с подробным описанием каталогов и т. д. В ней реализованы высокая степень

безопасности на трех уровнях (паролирование на уровне базы данных, веб-сервисов, веб-приложений); дополнительная защита данных обеспечивается через веб-адаптер веб-сервера.

Подсистема включает три основных компонента:

- компонент базы данных, предназначенный для управления, поддержки и ведения массивов гидрометеорологической информации;
- ГИС-компонент для управления ГИС серверами и автоматизированными рабочими местами, предназначенными для расчетов и прогнозов гидрометеорологических параметров, а также для подготовки фактической и прогностической информации (серверные и корпоративные ГИС);
- веб-компонент для взаимодействия с пользователями (веб-сервер с веб-приложением).

Структурная схема подсистемы подготовки и доведения до пользователей выходной продукции представлена на рис. 5.8 [85].

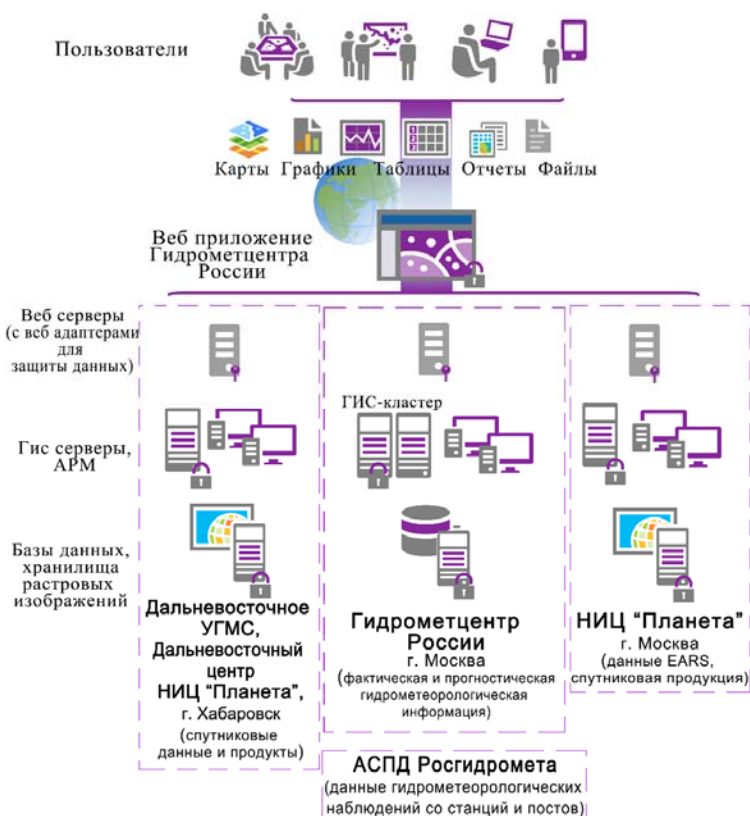


Рис. 5.8. Структурная схема подсистемы подготовки и доведения до потребителей выходной продукции системы раннего предупреждения ГИС «Амур».

Система раннего предупреждения о паводках и наводнениях ГИС «Амур» внедрена в оперативную практику гидрологического прогнозирования Росгидромета и используется специалистами ФГБУ «Дальневосточное УГМС» при выпуске краткосрочных и среднесрочных прогнозов паводков на реках бассейна Амура. Она разработана на основе ГИС- и веб-технологий, имеет большую степень надежности и безопасности, обладает повышенным быстродействием. В ходе эксплуатации начиная с 2015 года ГИС «Амур» продемонстрировала высокую эффективность работы: точность и надежность прогнозирования, оперативность доведения продукции до конечных пользователей, широкое разнообразие типов и форматов выходной продукции, что позволяет использовать ее в качестве прототипа при развитии подобных систем для других крупных бассейнов рек Российской Федерации. Ведущим мировым центром по геоинформационным технологиям ESRI (Environmental Systems Research Institute) СРП ГИС «Амур» была объявлена как «Проект 2015 года», а Гидрометцентр России и НИЦ «Планета» (организации-разработчики системы) получили высшую награду за особые достижения в области применения геоинформационных технологий – Special Achievement in GIS (SAG Award 2015). Пример представления прогностической продукции в рамках системы раннего предупреждения ГИС «Амур» представлен на рис. 5.9.

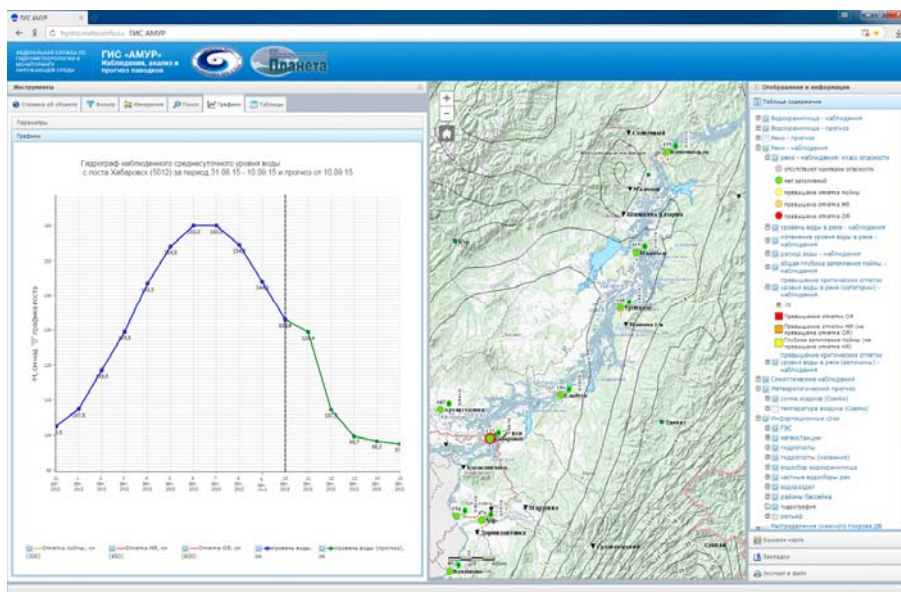


Рис. 5.9. Пример представления прогностической продукции в рамках системы раннего предупреждения ГИС «Амур».

Система раннего предупреждения ГИС «Волга»

В 2018 году была разработана и введена в эксплуатацию СРП по бассейну Волги – ГИС «Волга» [98], созданная в рамках проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета – 2». Разработка СРП в бассейне Волги по сути представляла из себя модернизацию базовой технологии гидрологического прогнозирования, включая краткосрочные и долгосрочные прогнозы водного режима, а также прогнозы ледового режима в бассейне Волги. В первую очередь была создана и внедрена в автоматизированную работу (автоматизированное пополнение данными, их последующая обработка) база данных гидрометеорологической информации, выполняющая роль информационной компоненты базовых технологий гидрологического прогнозирования в рамках данной СРП.

В методической части СРП была автоматизирована методика прогноза среднесуточных значений расхода (уровня) воды для периода весеннего половодья и летне-осеннего паводкового периода на реках бассейна Волги, основанная как на моделях формирования стока (Гидрометцентра России и НВВ-96), так и на упрощенных подходах – экстраполяции гидрографа и приближенной трансформации паводковой волны. Созданы средства представления выходной прогностической продукции с помощью программных средств ГИС. Разработана графическая форма представления гидрографа уровней (расходов) воды, отображающего как наблюдаемые, так и прогностические данные, которая включает отметки поймы, неблагоприятных и опасных отметок уровня воды для быстрого понимания гидрологической обстановки на рассматриваемом гидрологическом посту.

Одним из наиболее важных компонент ГИС «Волга» является веб-приложение, который позволяет пользователю выполнять разнообразные действия, в том числе: просмотр гидрометеорологической информации, ее фильтрация, выборка по времени и пространственному охвату, построение графической продукции, осуществление экспорта оперативной информации в различные форматы и др. (рис. 5.10). Основная задача веб-приложения – обеспечить пользователю системы понятный, удобный и легкий доступ ко всем ресурсам модернизированных базовых технологий гидрологического прогнозирования в бассейне Волги. В веб-приложении предусмотрена возможность проверки точности прогнозов, при этом осуществляется графическое совмещение фактических и прогностических данных об уровне воды. Неблагоприятные гидрологические явления отображаются на картах затопления речных пойм, построенных по спутниковым данным с помощью водного индекса. Кроме того, с помощью графического интерфейса можно комбинировать спутниковые данные с наземной гидрологической информацией. Графический

интерфейс веб-компонента подсистемы выполнен на языке программирования *JavaScript* с использованием технологии *API for ArcGIS*, что дает возможность пользователю запускать веб-приложение на любых медиа носителях (компьютерах, планшетах, смартфонах и др.), имеющих выход в Интернет, без установки дополнительных программ.

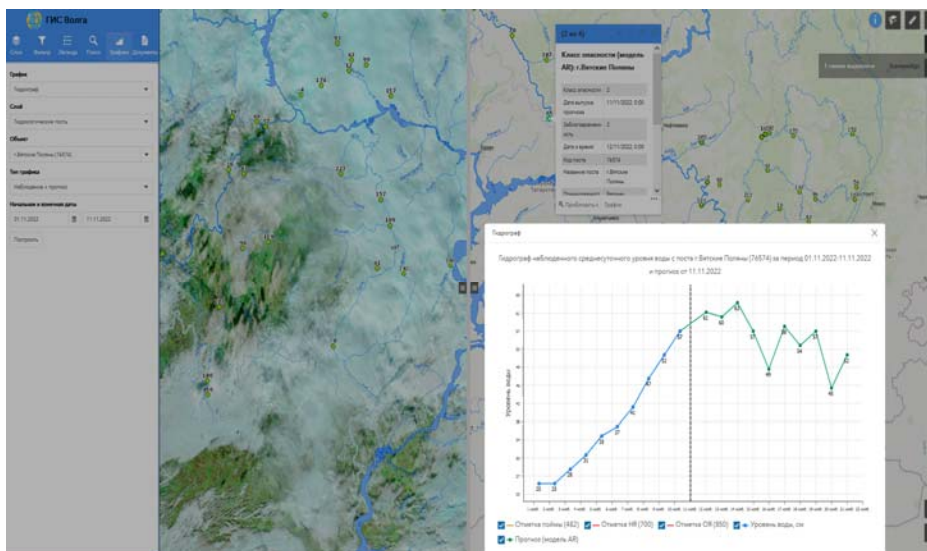


Рис. 5.10. Вид веб-приложения системы раннего предупреждения ГИС «Волга».

В этом веб-приложении предусмотрены широкие возможности для выборки гидрометеорологической информации по ряду критериев: времени (дате, сроку наблюдений или выпуска прогноза), принадлежности к гидрологическому посту или метеорологической станции, территориальному признаку (субъектам Российской Федерации, районам бассейна р. Волга, принадлежности к УГМС Росгидромета, принадлежности к отдельным притокам и произвольной области), заданным критериям (например, уровень воды выше 1 м и др.).

Система раннего предупреждения ГИС «Волга» в настоящий момент используется в автоматизированном режиме и производит выпуск информационно-аналитической и прогностической продукции, записывает результаты прогнозов и данные наблюдений в современные базы данных, а также производит визуализацию всего массива информации в рамках веб-приложения. Предложенная модернизированная технология позволяет улучшить обеспечение финальной продукцией потребителей прогнозов в бассейне Волги.

Система раннего предупреждения на реках бассейна Кубани и Черноморского побережья Краснодарского края

Одной из первых систем раннего предупреждения, разработанной в Гидрометцентре России является система паводков на реках бассейна Кубани и реках Черноморского побережья России, разработанная в 2012 году [11, 14]. В рамках данной системы в автоматизированной форме происходит наполнение баз данных оперативной гидрометеорологической информации, осуществляется запуск методик краткосрочного прогноза уровня (расхода) воды на гидрологических постах, а также визуализация прогностической информации и ее рассылка пользователям в табличном, цифровом и графическом виде (рис. 5.11).

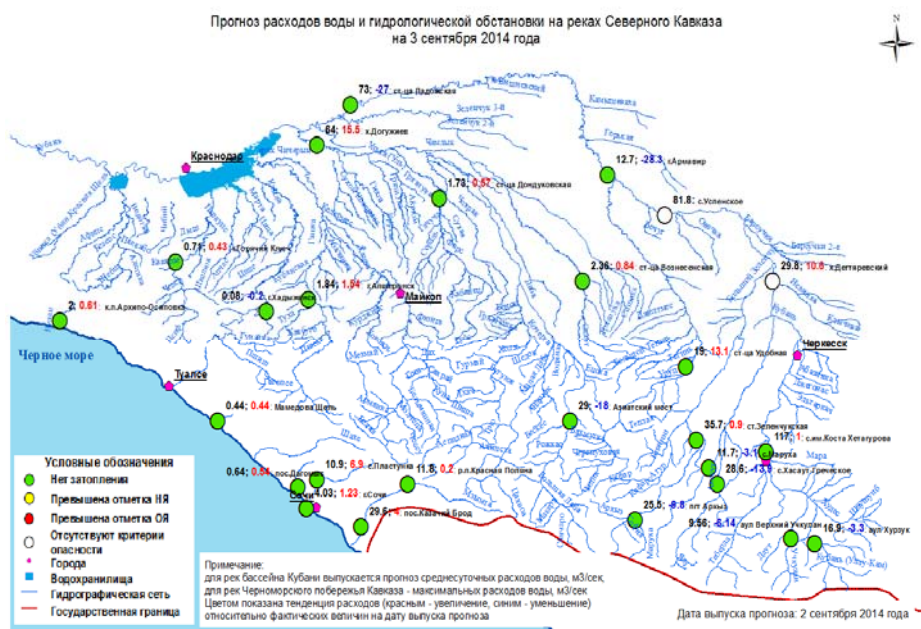


Рис. 5.11. Карта прогноза расхода воды в бассейне р. Кубань и на реках Черноморского побережья Краснодарского края.

Система позволяет в автоматизированном виде рассчитывать ход уровня (расхода) воды на основных гидрологических постах на следующие трое суток от момента выпуска прогноза с использованием оперативных данных наблюдений на гидрологических постах и метеорологических станциях, гидрологических моделей и численного прогноза погоды.

Автоматизированная система выпуска долгосрочных прогнозов речного стока Гидрометцентра России

Долгосрочные прогнозы водного и ледового режимов рек, озер и водохранилищ являются одними из основных видов прогностической продукции, поскольку от их правильности зависит работа многих секторов экономики, например гидроэнергетика, водный транспорт, сельское хозяйство, рекреация и т. д. Кроме того, снижение риска бедствий при прохождении высокого половодья начинается заранее еще в конце зимнего периода в том числе при учете долгосрочного прогноза максимального уровня воды весеннего половодья на реках, а также прогнозе мест с максимальной вероятностью формирования опасных заторов льда. Данные долгосрочных прогнозов поступают многим конечным потребителям – прежде всего, в МЧС России, Росводресурсы, Росморречфлот, Минсельхоз и другие министерства и ведомства.

Методики долгосрочного прогноза, на которых основан выпуск оперативных долгосрочных прогнозов Росгидромета, в основном основаны на использовании физико-статистических зависимостей, когда начальные условия (например, характеристики снежного покрова, влажность и промерзание почво-грунтов) задаются по частным водосборам речного бассейна, а остальные характеристики потерь стока на водосборе учитываются приближенно исходя из эмпирических зависимостей. Например, для бассейнов р. Волга в 2017 году были частично автоматизированы методики долгосрочного прогноза притока воды к некоторым водохранилищам с использованием *Python*. Разработанные программные средства, автоматизирующие выпуск долгосрочного прогноза притока воды к водохранилищам, помещены на диск в директорию «долгосрочные прогнозы/прогноз притока воды». Программные средства выполняют автоматизированный расчет долгосрочных прогнозов объема притока воды в водохранилища за второй квартал и за апрель по данным о снегозапасах и расходах воды из оперативной реляционной БД «Волга» под СУБД *MS SQL Server*.

В последнее время в оперативной гидрологии все чаще используются методики долгосрочного прогноза, основанные на применении моделей формирования стока на водосборе и ансамблевого задания метеорологической информации на период заблаговременности гидрологического прогноза. Например, для прогноза притока воды за квартал и за месяц используется физико-математическая модель формирования стока ECOMAG совместно с методами ансамблевого задания метеорологической информации и постобработки выходных результатов [16, 60, 116, 117].

Автоматизированная система построена на стандартном подходе – была сформирована информационная основа, содержащая всю необходимую входную информацию для модели (температура воздуха, осадки,

дефицит влажности воздуха на метеорологических станциях и расходы воды на гидрологических постах бассейна Чебоксарского водохранилища), далее была автоматизирована модель ЕСОМАГ, работающая в связке с исходной оперативной и архивной гидрометеорологической информацией. На выходе в автоматизированном виде получаются прогнозистические данные об ожидаемом притоке воды за второй квартал с разбивкой по месяцам. Прогноз представляется как в детерминированном виде, так и в ансамблевой форме. Соответствующее программное обеспечение подготовлено специалистами ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУН «Институт водных проблем РАН» [7, 8, 24, 33] и работает в оперативном режиме с 2018 года. Пример выходной продукции автоматизированной системы долгосрочного прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище показан на рис. 5.12.

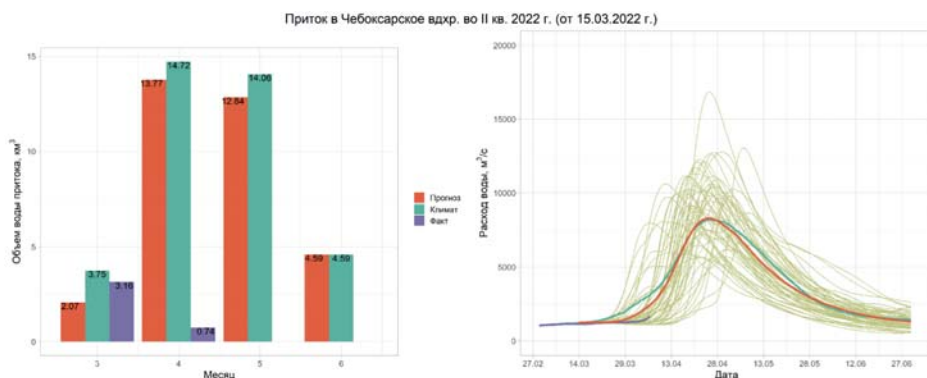


Рис. 5.12. Пример выходной продукции автоматизированной системы долгосрочного прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище [24, 33].

Долгосрочные прогнозы ледового режима рек представляются крайне важными для потребителей, например при планировании северного завоза и режима замерзания сибирских рек. В ФГБУ «Гидрометцентр России» долгосрочный прогноз ледообразования основан на подходе Б.М. Гинзбурга, где используется анализ развития полей метеорологических элементов в приземном слое и в тропосфере Северного полушария в предшествующий период времени. Характеристики метеорологических элементов получены путем разложения по естественным ортогональным функциям метеорологических полей геопотенциала на уровнях H100 и H500. Методика позволяет учитывать влияние атмосферных процессов на всем Северном полушарии, что дает наиболее полную характеристику особенностей метеорологических полей для выделения наиболее значимых. В качестве предикторов использовались

данные объективного анализа о состоянии атмосферы, постоянно обновляемые в режиме реального времени за зимние и летние месяцы, выполняемого в ФГБУ «Гидрометцентр России» [69].

Разработано программное обеспечение для автоматизации выпуска прогнозов сроков замерзания и вскрытия р. Волга. Вся исходная гидрометеорологическая информация, необходимая для выпуска прогноза, получается из банка данных Гидрометцентра России. В качестве предикторов использовались данные объективного анализа состояния атмосферы, а также поля аномалий температуры поверхности северо-западной части Атлантического и северной части Тихого океана. Программное обеспечение состоит из двух компонент, реализованных на языке *Python*. Первая компонента предназначена для считывания с банка данных Гидрометцентра России и последующего накопления информации, используемой при выпуске прогнозов. Данные получают в формате CSV (.csv), по выявленным наиболее информативно значимым районам, с последующим автоматическим накоплением данных в специализированный архив полей геопотенциалов на уровнях H100 и H500. Архив для геопотенциалов – H100 DATAh100.csv для H500 h500.csv. Вторая компонента, состоящая из шести программ, осуществляет непосредственный выпуск прогнозов [69]. В целом, разработка двух указанных программных компонент позволяет полностью автоматизировать работу с исходными полями объективного анализа и проведением всех необходимых расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» выполнено исследование возможностей прогнозирования стока рек нашей страны, которое позволило получить следующие рекомендации и результаты.

1. Рекомендованы наиболее надежные и доступные методы получения оценок погрешности прогноза, а в целях снижения этой погрешности рекомендованы и снабжены примерами их успешного применения метод линейной регрессии, метод частичного осреднения прогнозов и метод учета автокорреляции ошибок прогнозов.

2. При получении выводов об эффективности методик прогнозирования предлагается не ограничиваться принятыми в отечественной и зарубежной практике гидрологического прогнозирования оценками, но и учитывать запросы потребителей этих прогнозов.

3. Для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока в качестве первого приближения рекомендуется использовать метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются только известные значения прогнозируемой величины за дату выпуска прогноза и за несколько предыдущих суток. Реализация этого метода для расположенных практически по всей территории страны 2776 речных бассейнов показала, что он может давать хорошие и удовлетворительные прогнозы для достаточно крупных рек, с плавными очертаниями гидрографа.

4. Выполнено районирование территории России, которое позволяет оценивать возможности применения данного метода в зависимости от площади водосбора и его среднего уклона.

5. Разработана автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных прогнозов расходов воды на основе концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и системы краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru. Она реализована для 546 речных бассейнов, расположенных практически по всей территории России.

6. В рамках разработки предлагаемой схемы получения прогнозов выполнена оценка точности моделирования речного стока и используемых в этой схеме метеорологических прогнозов. Проверка показала, что предлагаемая автоматизированная система позволяет получать хорошие и удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью до трех суток более чем для 60 % речных бассейнов.

7. Успешное применение предлагаемой системы продемонстрировано на примере рек бассейна Камы, для которых получена оценка влияния ошибок метеорологических прогнозов на погрешность прогнозирования речного стока и выполнено сравнение результатов применения данной системы с прогнозами, получаемыми методом экстраполяции гидрографа.

8. Предложена и практически реализована оценка влияния неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочного прогноза речного стока на его погрешность. Показано, что в зависимости от водного режима реки и прогнозируемой характеристики ее стока она может составлять от 20 до 80 % погрешности ее прогноза.

9. Показано, что недостаток сведений о пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока приводит к тому, что содержащиеся в схемах получения его долгосрочных прогнозов физически обоснованные теоретические формулы превращаются в чисто эмпирические.

10. В качестве успешного применения рекомендации по отказу от неработающих теоретических формул и учету статистических свойств располагаемой гидрометеорологической информации для рек бассейна Тобола предложены методики долгосрочного прогнозирования стока за второй квартал и максимального уровня весеннего половодья.

11. Получена оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность долгосрочных прогнозов речного стока, на основе которой предложены рекомендации по оптимизации сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги.

12. Обобщение мирового опыта в области создания систем подготовки, выпуска прогнозов речного стока и их доведения до всех заинтересованных потребителей позволило предложить общий методический подход к разработке систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях.

13. Этот подход использован в Гидрометцентре России при разработке автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов уровней и расходов воды для рек, расположенных практически во всех регионах России.

14. Для регионов с максимальной паводковой опасностью – бассейнов рек Амур, Кубань и Черноморского побережья Краснодарского края – предлагается система раннего предупреждения об опасных паводках и ожидаемых наводнениях.

15. Для бассейна Волги разработана автоматизированная система подготовки, выпуска и доведения до потребителей прогнозов речного стока различной заблаговременности. Система позволяет повысить

обоснованность водохозяйственных решений и своевременность мер по защите от опасных явлений, связанных с водным и ледовым режимом рек.

Полученные рекомендации и результаты могут быть использованы в оперативной деятельности учреждений Росгидромета в целях повышения точности гидрологических прогнозов, увеличения числа водных объектов, для которых такие прогнозы могут составляться, и в целях совершенствования системы доведения прогностической информации до ее потребителей.

Литература

1. Акилина В.А., Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4 (386). – С. 64–78.
2. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 387 с.
3. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
4. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 2012. – 142 с.
5. Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 346. – С. 53–61.
6. Бобровицкая Н.Н. Современное состояние гидрологической сети России и основные направления ее развития // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 5–8.
7. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – Книга 1. – 406 с.
8. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. – 317 с.
9. Большая российская энциклопедия: электронная версия. – 2016.
10. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. – М.: Изд-во АСТ, 2019. – 224 с.
11. Борщ С. В., Симонов Ю. А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 63–87.
12. Борщ С. В., Бураков Д. А., Симонов Ю. А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 359. – С. 23–38.
13. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Специальный выпуск 355. – 198 с.
14. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Специальный выпуск 356. – 247 с.
15. Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В., Юмина Н. М. Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 353. – С. 26–45.

16. Борщ С.В., Гельфан А.Н. Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 68–86.
17. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. – М.: Гидрометцентр России, 2018. – 160 с.
18. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В., Юмина Н.М. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2018. – №3 (369). – С. 74–86.
19. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2018. – №4 (370). – С. 122–136.
20. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В. Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 3 (369). – С. 62–73.
21. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 1 (375). – С. 162–175.
22. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 1 (375). С. 176–189.
23. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94.
24. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 3 (381). – С. 115–130.
25. Борщ С.В., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методики краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 3 (385). – С. 127–143.
26. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище в современных условиях // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4 (386). – С. 47–63.
27. Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Влияние неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4 (386). – С. 36–46.
28. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 278 с.
29. Бураков Д.А. Воднобалансовые зависимости для прогнозов стока талых вод в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Труды зсРНИИГМИ. – 1977. – Вып. 35. – С. 24–32.

30. Бураков Д.А., Литвинова О.С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. – 2010. – Вып. 3. – С. 111–120.
31. Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишников Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. – 2021. – № 5. – С. 91–100.
32. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный региональный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
33. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.
34. ВМО-№ 1259. Комиссия по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, воды и соответствующих областях окружающей среды: Сокращенный окончательный отчет первой сессии. – 214 с.
35. Всемирный метеорологический конгресс: Сокращенный окончательный отчет внеочередной сессии (ВМО-№ 1281). – 2021.
36. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 359 с.
37. Гармаев Е.Ж. Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. – Новосибирск: ГЕО, 2010. – 227 с.
38. Гарцман Г.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 222 с.
39. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 276 с.
40. Гельфан А.Н. О проблеме валидации гидрологической модели для диагностических задач. Сб. «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения». – Новочеркасск, 2017, с. 143 – 149.
41. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 36–79.
42. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Вишневская И.А, Бородина О.О. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона. – М.: МАКС Пресс, 2014. – 214 с.
43. Гост ИСО/МЭК ТО 10032–2007. Эталонная модель управления данными. – 29 с.
44. Данилов-Данильян В.И., Залиханов М.Ч., Лосев К.С. Экологическая безопасность. Общие принципы и российский аспект. – М.: Изд-во МППА БИМПА, 2007. – 288 с.
45. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. – М.: ГЕОС, 2017. – 204 с.
46. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.

47. Жабина И. И., Пурина И. Э., Степанов Ю. А., Чекулаева Т. С. Новые оперативные технологии обработки гидрометеорологических данных и управления прикладными программами с использованием супер-ЭВМ CRAY // 70 лет Гидрометцентру России. – СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – С. 90–117.
48. Закономерности гидрологических процессов / под ред. Н.И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2012. – 733 с.
49. Змиева Е.С., Комаров В.Д., Сапожников В.И. Методы прогнозов весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада // Труды Гидрометцентра СССР. – 1967. – Вып. 8. – Р. 25–49.
50. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. – 2013. – № 1. – С. 60–76.
51. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1959. – 259 с.
52. Комаров В.Д., Мухин В.М., Полунин А.Я. Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра СССР. – 1976. – Вып. 163. – С. 38–57.
53. Кондратюк В.И., Покровский О.М., Светлова Т.П. О принципах построения наземной сети // Труды ГГО. – 1999. – Вып. 547. – С. 3–14.
54. Корень В.И., Бельчиков В.А. Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 176 с.
55. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 200 с.
56. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 216 с.
57. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). – М.: Изд-во ИВП РАН, 2008. – 394 с.
58. Методика расчета ежедневного притока воды в Цимлянское водохранилище. – Ростов-на Дону: Изд-во Северо-Кавказского УГМС, 1989. – 62 с.
59. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 117 с.
60. Морейдо В.М. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего половодья и летней межени на основе динамико-стохастической модели формирования речного стока // Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года". – 2015. – С. 180–186.
61. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. – М.: Изд-во РАН, 2018. – 300 с.
62. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24–36.
63. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.

64. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.88.629-2002. – 42 с.
65. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования Том 1 // ВМО-№ 485. – Женева, 2010. – 37 с.
66. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 229 с.
67. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
68. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы // Под редакцией В.Ю. Георгиевского. – СПб.: Гидрометеиздат, 2015. – 135 с.
69. Павроз Ю.А. Опыт разработки методики долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – Вып. 382. – С. 99–111.
70. Перечень действующих гидрологических постов сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665).
71. Покровский О.М. О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 8. – С. 5–21.
72. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Методические указания. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.
73. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район / Под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 267 с.
74. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Tobol / Под ред. В.В. Николаенко. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 240 с.
75. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Блинов Д. В. Технологическая линия системы краткосрочных мезомасштабных оперативных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 61–80.
76. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Б.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 58–71.
77. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татаринич Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 37–53.
78. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 356 с.
79. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.

80. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения // ВМО-№ 0168. – 1994. – 808 с.
81. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015-2030 гг. – Женева: Управление ООН по уменьшению опасности бедствий, 2015. – 40 с.
82. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 6. – С. 55–65.
83. Системы заблаговременных предупреждений о многих опасных явлениях. – Женева: ВМО, 2018. – 22 с.
84. Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В. Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – Вып. 4 (374). – С. 257–285.
85. Фролов А.В., Асмус В.В., Вильфанд Р.М., Борщ С.В., Жабина И.И., Затыгалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А. Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях «ГИС Амур» // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 3. – С. 5-21.
86. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 166 с.
87. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
88. Христофоров А.В. Эколого-экономические основы водопользования. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 160 с.
89. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Изд-во АПР, 2017. – 151 с.
90. Швер Ц.А. Закономерности распределения количества осадков на континентах. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 284 с.
91. Экстремальные гидрологические ситуации / Под ред. Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцевой. – М.: Медиа-ПИРЕСС, 2010. – 464 с.
92. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. – Academic Press, 2016. – 480 p.
93. Barrett C., Canterford R. Assessment Report, Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project (CIFDP). – Geneva, World Meteorological Organization, 2018.
94. Bergstrom S. The HBV model - its structure and applications // SMHI Hydrology. 1992. – RH No.4, Norrköping. – 35 p.
95. Bergström S. The HBV model. In: V.P. Singh (Ed.), Computer models of Watershed Hydrology // Water Resources Publications, Highland Ranch, CO. – 1995.
96. Borsch S., Simonov Y. Operational Hydrologic Forecast System in Russia // Flood Forecasting. A Global Perspective. – Academic Press, 2016. – 478 p. – Chapter 7. P. 169-182.
97. Borsch S., Khristoforov A., Krovotynzev V., Leontieva E., Simonov Y., Zatyagalova V. A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin // Geosciences. – 2018. – Vol. 8. – P. 93.

98. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method // *Hydrology*. – 2022. – Vol. 9, no. 1. – P. 1–14.
99. Brier G.W. Verification of forecasts expressed in terms of probability // *Mon. Weth. Rev.* – 1950. – Vol. 78. – P. 1–13.
100. Buizza R., Hollingsworth A., Lalauette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System // *Weather and Forecasting*. – 1999. – Vol. 14. – P. 168–189.
101. Burman P., Chow E., Nolan D. A cross-validatory method for dependent data // *Biometrika*. – 1994. – No. 81. – P. 351–358.
102. Carpenter T.M., Georgakakos K.P., Sperflage J.A. Distributed hydrologic modeling for operational use // *HRC Technical Report No. 3*. – 1999. – 224 p.
103. Chow V.T., Maidment D. R., Mays L.W. *Applied Hydrology*. – New York: McGraw–Hill, 1988. – 627 p.
104. Curtis B. Barrett, Marcelo Uriburu Quirno, Yuri Simonov. Review of the Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage Project. – Geneva, December 2018. – 100 p.
105. Davie T. *Fundamentals of hydrology: Second edition*. – London; New York: Taylor & Francis, 2008. – 221 p.
106. Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A.L., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kjevstad O., Lyon B., Yetman G. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. Disaster Risk Management Series No. 5. – Washington, DC, World Bank, 2005.
107. Dingman S.L. *Physical Hydrology*. – New York: Macmillan Publishing Company, 1993. – 575 p.
108. Doherty J. *Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models*. – Published by Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2015. – 227 p.
109. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T.W.L., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J.J.F., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by HBV model // *Hydrol. Earth System Sci.* – 2010. – Vol. 14, no. 4.
110. Duan Q.Y., Gupta V.K., Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization // *J. Optimum Theory Application*. – 1993. – Vol. 76, no. 3. – P. 501–521.
111. *Economic and environmental principles and guidelines for water and related land resources implementation studies* // Water Resource Council (U.S.). – 1982. – Vol. 47, no. 55. – 129 p.
112. Efron B. *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resembling Plans*. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982. – 92 p.
113. *FAO Irrigation and drainage paper 56. Crop evapotranspiration–Guidelines for computing crop water requirements*, 1998. – 281 p.
114. *Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner’s Guide* / Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. – John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 240 p.
115. Frolov V., Asmus V., Borshch S., Vilfand R., Zhabina I., Zatyagalova V., Krovotyntsev V., Kudryavtseva O., Leonteva E., Simonov Y., Stepanov Y.. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning // *Russ. Meteorol. Hydrol.* – 2016. – Vol. 41. – P. 157–169.

116. Gelfan A.N., Motovilov Y.G., Moreido V.M. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // IAHS-AISH. Proceedings and Reports. Extreme Hydrological Events. – 2015. – P. 115–120.

117. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the cheboksary reservoir under two different weather scenarios // Hydrology and Earth System Sciences. – 2018. – Vol. 22, no. 4. – P. 2073–2089.

118. Georgakakos K.P., Graham R., Jubach R., Carpenter T., Shamir E., Spencer C., Sperflage J. HRC Technical Report No. 9. Global Flash Flood System, Phase 1. – 2013. – 134 p.

119. Georgakakos K.P., Modrick T.M., Shamir E., Campbell R., Cheng Z., Jubach R., Sperflage J., Spencer C.R., Banks R. The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-To-Operations Effort // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2021. – Published-online 09 Nov 2021.

120. Golnaraghi M. Institutional Partnerships in Multi-Hazard Early Warning Systems: A compilation of Seven National Good Practices and Guiding Principles. – Springer, 2012. – 243 p.

121. Goswami M., Connor K.M., Dhatarai K.P., Shamseldin A.Y. Assessing and performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River // Hydrology and Earth System Sciences. – 2005. – Vol. 9, no. 4. – P. 394–411.

122. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. – London: Taylor and Francis Group, 2004. – 1024 p.

123. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // WMO-№ 0168. – 2009. – 238 p.

124. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-№ 0168. – 2009. – 302 p.

125. Guidelines in Implementation of Coastal Inundation Forecasting – Early Warning System // WMO-No. 1293 – 2022. – 61 p.

126. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling // Journal of Hydrology. – 2009. – No. 377. – P. 80–91.

127. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. – 1995. – Vol. 54. – P. 127–140.

128. Handbook of Hydrology / D.R. Maidment (ed.). – New York: Mc Graw Hill, 1993. – 978 p.

129. ISO/IEC TR 10032 Information technology – Reference model of data management. – 2003.

130. Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Forecast Verification. – Wiley, 2003. – 240 p.

131. Kahneman D., Tversky A. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science. – 1974. – No. 4157. – P. 1124–1131.

132. Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr. DWAT – User's Manual V1.0. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018. – 111 p.

133. Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology // Journal of Hydrology. – 2001. – No. 249. – P. 2–9.

134. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) // Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55. – Geneva: HWR, 1994. – 23 p.
135. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M. & Bergström, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // Journal of Hydrology. – 1997. – Vol. 201, no. 1–4. – P. 272–288.
136. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva: HWR, 1995. – 26 p.
137. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-№ 1072. – 2011. – 138 p.
138. Mishra A.K., Coulibaly P. Developments in hydrometric network design: A review // Reviews of Geophysics. – April 2009. – Vol. 47 (2). – DOI:10.1029/2007RG000243
139. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE. – 2007. – Vol. 50, no. 3. – P. 885-900.
140. Motovilov Y.G. ECOMAG – regional model of hydrological cycle and pollution transformation in river basins. Application to the NOPEX region // Report Research Council of Norway. – Oslo; Moscow, 1995. – 64 p.
141. Multi-hazard Early Warning Systems: A Checklist. – World Meteorological Organization, 2018 – 18 p.
142. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10. – P. 282–290.
143. National Weather Service River Forecast Verification Plan. Report of the Hydrologic Verification System Requirements Team. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. – 2006. – 44 p.
144. Nijkamp P. Cost – Benefit Analysis and Water resource Management. – Amsterdam, 2005. – 312 p.
145. Osuch M., Romanowicz R.J., Booij M.J. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics // Hydrol. Sci. J. – 2015. – Vol. 60, no. 7–8. – P. 1299–1316.
146. Paul J. Pilon, Marcelo Uriburu Quirno. Proceedings of the Global Flash Flood Guidance System Workshop, February 2019, Geneva.
147. Predictability of Weather and Climate / T. Palmer, R. Hagedorn (Eds.) – Cambridge University Press, 2006. – 635 p.
148. Ritter A., Muñoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments // Journal of Hydrology. – 2013. – Vol. 480. – P. 33–45.
149. Rivin G., Rozinkina I., Astakhova E., Montani A., Alferov D., Arpagaus M., Helmert J., Kazakova E., Kirsanov A., Kopeikin V., Kukanova E., Majewski D., Marsigli C., de Morsier G., Muravev A., Paccagnella T., Schattler U., Schra C., Shatunova M., Shcherbakov A., Steiner P., Zaichenko M. The COSMO Priority Project CORSO Final Report // COSMO Technical Report. – 2018. – No. 35. – 65 p.
150. Shiklomanov I.A. Water resources as a challenge of the twenty-first century // WMO-No. 959. – Geneva: World Meteorological Organization, 2004. – 146 p.

-
151. Special issue on Forecast Verification // *Meteorological Applications*. – 2008. – Vol. 15, is. 1. – P. 1–3.
152. *Statistical Methods In The Atmospheric Sciences* / R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby (Eds.) *International Geophysics Series*. – 2011. – Vol. 100. – 676 p.
153. Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y. Early Warnings of Coastal Inundation // *Bulletin WMO*. – 2019. – Vol. 68 (2). – P. 49–55.
154. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading, Mass. – Addison-Wesley, 1977. – 688 p.
155. Van Dirk M.J., Rienties T.H. *Geostatistics and Hydrology: Part 3: Hydro-Meteorological Network Design*. Report no. 59, 1994. – 29 p.
156. Welles E. *Verification of river stage forecasts*. – University of Arizona, 2005. – 157 p.
157. Wiener N. *The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. – MIT Press: Cambridge, MA, USA; John Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1964. – 171 p.
158. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. – Academic Press, 2006 – 467 p.
159. WMO-No. 1281. *World Meteorological Congress. Abridged Final Report of the Extraordinary Session. Virtual session, 11–21 October 2021* – 248 p.
160. WMO-No. 1286. *Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems*. – World Meteorological Organization, 2022. – 27 p.
161. WMO-No. 429. *World Meteorological Organization Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting. Operational Hydrology Report No. 7*. – Geneva: World Meteorological Organization, 1987.
162. WMO-No. 749. *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture. Operational Hydrology Report No. 35*. – Geneva: World Meteorological Organization, 1992. – 271 p.
163. *World Meteorological Organization. Coastal Inundation Forecasting Demonstration Project Implementation Plan. Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Technical Report No. 64*. – Geneva: World Meteorological Organization, 2017.
164. Yen B.C. *Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering*. – Col., Littleton: Water Resources Publications, 1986. – 278 p.
165. Yokum J.T., Armstrong J.S. *Beyond Accuracy: Comparison of criteria used to select forecasting methods* // *International Journal of Forecasting*. – 1995. – № 11. – P. 591–597.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Прогнозирование речного стока	5
1.1. Общие положения	6
1.2. Погрешность прогнозов речного стока	10
1.3. Методы коррекции прогнозов речного стока	16
1.4. Эффективность прогнозов речного стока	24
Глава 2. Прогнозирование речного стока методом экстраполяции гидрографа	35
2.1. Метод экстраполяции гидрографа	35
2.2. Возможности прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа	45
2.3. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды в речных створах бассейна Тобола	55
2.4. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование стока рек бассейна Дона и притока воды в Цимлянское водохранилище	65
Глава 3. Краткосрочное прогнозирование речного стока на основе модели HBV-96 и системы COSMO-Ru	76
3.1. Расчет среднесуточных расходов воды на реках России с использованием модели формирования стока HBV-96	76
3.2. Возможности использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России	84
3.3. Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-Ru	96
3.4. Краткосрочное прогнозирование стока рек бассейна Камы	45
Глава 4. Возможности долгосрочного прогнозирования речного стока	109
4.1. Неопределенность метеорологических элементов в период заблаговременности долгосрочных прогнозов речного стока	109
4.2. Неопределенность пространственной изменчивости характеристик формирования речного стока	117

4.3. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола	124
4.4. Долгосрочное прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище	134
4.5. Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги	142
Глава 5. Системы выпуска прогнозов и их доведения до потребителей	152
5.1. Общие сведения о системах	152
5.2. Структура систем раннего предупреждения	161
5.3. Системы раннего предупреждения Гидрометцентра России	172
Заключение	185
Литература	188

С.В. Борщ, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА
РЕК РОССИИ**

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@mecom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 14.02.2023. Формат 70×100/16 Печать
офсетная. Печ. л. 12,5. Тираж 80 экз. Заказ № 149
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3

ISBN 978-5-9908623-8-8



9 785990 862388