

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-71-117>

УДК 556.06

Выбор методов прогнозирования речного стока

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

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
khrstoforov_a@mail.ru*

Рассматривается выбор методов прогнозирования речного стока на основе учета факторов, лимитирующих заблаговременность и точность прогнозов, требований потребителей и результатов применения этих методов для конкретных водных объектов. В качестве наиболее эффективных рекомендуются методы, которые допускают их массовую реализацию в автоматизированном режиме. Показаны примеры успешной реализации этих рекомендаций при прогнозировании стока рек России на основе методов, разработанных в ФГБУ «Гидрометцентр России». Предлагаемые рекомендации направлены на повышение научной обоснованности и эффективности осуществления оперативных решений по использованию водных ресурсов и защите от опасных гидрологических явлений.

Ключевые слова: речной сток, прогнозы, методы, заблаговременность, точность, сравнение, факторы, экономическая эффективность, массовая реализация, автоматизированный режим, выбор, рекомендации

Selection of methods for streamflow forecasting

***S.V. Borshch, Yu.A. Simonov,
A.V. Khrstoforov***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
khrstoforov_a@mail.ru*

The selection of methods for streamflow forecasting is considered, taking into account factors that limit the lead time and accuracy of forecasts, consumer requirements, and the results of applying these methods for specific water bodies. Methods that allow their mass implementation in an automated mode are recommended as the most effective. Examples of successful implementation of these recommendations in streamflow forecasting in Russia based on the methods developed at the Hydrometcentre of Russia are shown. The proposed recommendations are aimed to increase the scientific validity and efficiency of implementing operational decisions on the use of water resources and protection from dangerous hydrological events.

Keywords: Streamflow, forecasts, methods, lead time, accuracy, comparison, factors, economic efficiency, mass implementation, automated mode, selection, recommendations

Введение

Прогнозирование гидрологических процессов является одним из наиболее быстро развивающихся направлений современной гидрологии. Это обусловлено произошедшим в последние годы качественным скачком в его информационном, техническом и научном обеспечении. Стали доступны более надежные и детальные метеорологические прогнозы, данные дистанционного зондирования наземными, авиационными и космическими средствами, данные учащенных наблюдений на гидрологических постах и площадные оценки метеорологических элементов. Совершенствуется программное обеспечение разработки и представления прогнозов с использованием геоинформационных и интернет-технологий. Одновременно с ростом информационной базы и развитием технических возможностей происходит разработка и внедрение новых математических моделей, дающих более детальное описание гидрологических процессов и предназначенных для получения не только краткосрочных, но и долгосрочных прогнозов. В последнее время методические основы гидрологического прогнозирования дополняются применением различных методов искусственного интеллекта. Методические основы гидрологического прогнозирования постоянно развиваются за счет обмена результатами, полученными в разных странах, что в решающей степени обеспечивается деятельностью Всемирной метеорологической организации.

Отмеченные позитивные тенденции делают все более актуальной проблему выбора общего метода прогнозирования заданной гидрологической характеристики и методики его реализации для конкретного водного объекта (реки, водохранилища, озера). Обоснование выбора общего метода прогнозирования требует учета факторов, лимитирующих заблаговременность и точность основанных на нем с гидрологических прогнозов. К числу этих факторов относятся научная обоснованность метода, обеспеченность его реализации располагаемой информацией, неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза, а также возможностями своевременного доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей.

Обоснование выбора методики прогнозирования заданной гидрологической характеристики для конкретного водного объекта требует статистического анализа достаточно продолжительных рядов проверочных прогнозов, полученных для сравниваемых методик. Кроме того, желательно учитывать мнение потребителей получаемой прогностической продукции, которое может зависеть не только от заблаговременности и точности прогнозов, но и от их экономической эффективности, включая затраты на их подготовку и выпуск. От уровня решения указанной проблемы в немалой степени зависит научная обоснованность планирования и эффективность проведения мероприятий по использованию водных ресурсов и защите от нежелательных и опасных явлений, связанных с гидрологическим режимом водных объектов.

В связи с этим в предлагаемой статье дается ряд рекомендаций по выбору методов прогнозирования речного стока.

1. Общие положения

1.1. Заблаговременность прогнозов

Возможности использования прогнозов характеристик гидрологического режима рек, озер 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 определяется с учетом времени, необходимого для принятия мер по использованию водных ресурсов и защите от опасных проявлений гидрологического 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 [7, 45, 51, 52].

Достижимая заблаговременность гидрологического прогноза речного стока зависит от характера прогнозируемого явления; физико-географических особенностей водосбора; конфигурации сети гидрометеорологических наблюдений; заблаговременности, точности и формы представления метеорологических прогнозов [6, 37, 51, 52, 55].

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 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 [7, 17, 42].

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 [18, 33].

Как правило, долгосрочные прогнозы речного стока 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.

1.2. Прогнозируемые характеристики речного стока

Долгосрочные и некоторые среднесрочные прогнозы водного режима рек и незарегулированного притока воды в водохранилища могут составляться для следующих характеристик:

- сезонный, кварталный, месячный и декадный сток;
- распределение стока реки или притока в водохранилище в течение сезона;
- объем, максимальный расход и уровень воды половодья и 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 [34, 37].

В ряде случаев возможно последующее уточнение долгосрочных или среднесрочных прогнозов. Например, для характеристик половодья выпускается уточняющий прогноз после схода основной массы сезонного снежного покрова [30, 34, 37, 45]. Подобные уточнения используют дополнительную информацию, еще неизвестную 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 уровень и расход воды за сутки;
- изменение расходов и уровней воды в течение определенного периода;
- дата начала, прохождения пика и конца половодья и паводка;
- объем, максимальный расход и уровень воды паводка;
- минимальный расход и уровень воды в период летне-осенней межени;
- минимальный уровень и расход воды в период навигации и зимней межени;
- характерный уровень и расход воды во время весенних и осенних ледовых явлений [35, 37].

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 [17]. Методика получения вероятностной формы выпуска прогноза строится на основе методики получения прогноза в детерминированной форме [6, 30, 37, 50]. Как показано в работе [6], 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.

1.3. 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 [18, 34–36].

Для получения прогнозов речного стока применяются следующие методы.

1. Физико-статистические зависимости прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза характеристик основных гидрометеорологических факторов, ее определяющих. Такие зависимости выражаются в виде графиков или эмпирических формул [6, 18, 37, 50, 52]. Благодаря своей простоте физико-статистические зависимости широко используются в практике оперативных гидрологических прогнозов в течение многих десятилетий и в ряде случаев остаются конкурентоспособными до сих пор [18]. Наиболее широко они используются для получения долгосрочных и среднесрочных прогнозов характеристик весеннего половодья, стока за отдельные месяцы маловодного периода года и характеристик ледовых явлений [34, 36]. В ряде случаев они используются и для получения краткосрочных прогнозов речного стока, в частности для получения прогнозов расходов и уровней на участках рек методом соответственных уровней [35].

2. Концептуальные модели, которые дают упрощенное описание процессов формирования речного стока с помощью полуэмпирических соотношений между характеристиками этих процессов. Как правило, они содержат блоки, схематизирующие процессы поступления воды на поверхность водосбора, включая динамику снежного покрова, потери стока на испарение и поверхностное задержание, перераспределение влаги в почве, формирование поверхностного, почвенного и подземного склонового стока и его трансформацию в гидрографической сети. Такие модели относятся к категории моделей с сосредоточенными параметрами, так как в них учитываются средние для всего водосбора гидрометеорологические характеристики основных процессов формирования речного стока. В ряде случаев выделяются сравнительно однородные частные бассейны, для каждого из которых реализуется модель с сосредоточенными параметрами. Такие модели относятся к категории моделей с частично распределенными параметрами [25, 52, 54, 55].

Для концептуальных моделей характерна относительная простота задания входной информации и выполнения расчетов. В то же время при их использовании для получения прогнозов стока конкретной реки оценка параметров этих моделей по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений может оказаться достаточно трудоемкой. Классическим примером концептуальной модели с сосредоточенными параметрами является нашедшая широкое применение в отечественной практике оперативного прогнозирования модель формирования талого и дождевого стока Гидрометцентра СССР [25, 35]. К наиболее распространенным концептуальным моделям формирования речного стока в настоящее время относится модель Шведского гидрометеорологического института HBV и ее многочисленные модификации [18].

3. Физико-математические модели, которые с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных дают подробное описание основных процессов формирования речного стока по всей территории водосбора. Такие модели относятся к категории моделей с распределенными параметрами, так как в них пространственная неоднородность формирования стока учитывается естественным образом. Большинство параметров физико-математических моделей имеет достаточно четкую физическую интерпретацию и не требует сложной процедуры калибровки [6, 34–36]. Одной из наиболее детальных физико-математических моделей формирования речного стока является модель ECOMAG, разработанная в Институте водных проблем РАН. В этой модели речной бассейн представлен в виде элементарных водосборов с относительно однородными условиями формирования стока, соединенными отрезками русловой сети. На каждом элементарном водосборе процессы формирования стока описаны с помощью детальных физико-математических моделей, в том числе: однослойной модели снежного покрова, модели термического режима в снеге, мерзлой и талой почве, модели процессов переноса влаги в почве, модели

склонового стекания и движения по русловой сети. На основе данной модели с использованием информационно-моделирующего комплекса разработаны региональные гидрологические модели для крупных речных бассейнов, в том числе Волги, Лены и Амура [29].

4. Модели перемещения волн паводков в руслах рек (модели трансформации), расчетные соотношения которых получаются в результате различного вида упрощений уравнения неразрывности и динамического уравнения потока. В качестве входной информации используются данные о расходах и уровнях воды, а также сопутствующая информация о морфометрических характеристиках русел и речных пойм. Такие модели призваны рассчитывать изменение в величине расхода воды, скорости течения и формы гидрографа в одном или нескольких створах вдоль русла реки по мере продвижения волны паводка вниз по ее течению. В практике оперативных прогнозов наибольшее распространение получили более простые модели, в которых трансформация волны паводка не учитывается или учитывается приближенно. В последние десятилетия, в связи с ростом мощности вычислительной техники, все шире используются гидродинамические модели перемещения волн паводков, основанные на численном решении системы уравнений Сен-Венана. Применение таких моделей требует большого объема данных гидрометрических наблюдений, а также информации о поперечных профилях на участке реки и других морфометрических данных о геометрии и поверхности русла и долины реки. В целом, гидродинамические модели существенно более трудоемки для внедрения в оперативную практику и требуют наличия существенных вычислительных ресурсов [25, 52, 55].

При получении краткосрочных прогнозов речного стока в качестве входной информации в концептуальную или физико-математическую модель его формирования используется прогноз хода метеорологических элементов в течение периода их заблаговременности. При получении долгосрочных прогнозов применяется ансамблевый подход, при котором модель формирования речного стока подставляются наблюдавшиеся сценарии хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза, и берется среднее значение выходов модели, соответствующих этим сценариям.

Под методикой понимается способ получения прогнозов заданной характеристики водного режима конкретного водного объекта. 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 [6, 18].

Получение и выпуск гидрологических прогнозов в оперативном режиме представляется весьма сложной в технологическом отношении задачей, решение которой можно сделать более эффективным и надежным с помощью внедрения автоматизированных систем, которые позволяют существенно облегчать и ускорять подготовку и выпуск прогнозов речного стока. Такие системы основаны на обработке исходной гидрометеорологической информации посредством систем управления базами данных и на математических моделях формирования стока, реализованных в виде автоматизированных программных средств. В рамках данного перспективного направления в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны автоматизированные системы выпуска гидрологических прогнозов для крупных речных бассейнов нашей страны – бассейна Кубани, рек Черноморского побережья России, бассейнов Амура и Волги [18].

Отдельного внимания заслуживают системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях. Отличительной чертой систем раннего предупреждения о наводнениях является автоматизированный процесс сбора, обработки и анализа исходной гидрометеорологической информации, автоматизированный выпуск гидрологических прогнозов и своевременное доведение прогностической продукции до конечных пользователей в рамках веб-приложения. В Европе уже действует Европейская система информирования о наводнениях (EFAS), которая осуществляет мониторинг и прогнозирование опасных паводков по всей территории ЕС. В настоящее время разрабатывается Глобальная система информирования о наводнениях (GloFAS) [18, 61].

1.4. Надежность гидрологических прогнозов

Надежность методики определяется погрешностью получаемых с ее помощью прогнозов. Погрешность прогнозов характеризует их вероятные ошибки. 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 изменяются 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 [6, 10, 13, 18]. 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 неизвестны или известны лишь приближенно. Погрешность методики гидрологического прогнозирования 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 [6, 18, 25, 28, 30, 33, 45, 50].

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 [6, 18, 52, 55].

При определении погрешности методики прогнозирования 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:

$$S^2 = M[(Y - \tilde{Y})^2]. \quad (1)$$

Формула (1) определяет среднеквадратическую погрешность прогноза S и полностью соответствует принятому подходу к определению погрешности различных статистических оценок [10, 59]. Отказ от такого показателя сопряжен со значительными трудностями математического характера вплоть до необходимости перестройки используемого аппарата математической статистики. Кроме того, как показано в работе [6] негативный эффект, возникающий при принятии различных водохозяйственных решений вследствие ошибок используемых прогнозов, приблизительно пропорционален квадрату величины 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 [6] 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 для конкретного потребителя, поэтому в последующем изложении используется среднеквадратическая погрешность прогноза S , определяемая формулой (1).

Для долгосрочных и среднесрочных гидрологических прогнозов, выпускаемых один раз в год, формула (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:

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

Оценка определяемой формулами (1) и (2) среднеквадратической погрешности прогноза S производится на основе статистического анализа ряда ошибок $Y - \tilde{Y}$ проверочных прогнозов. Желательно, чтобы этот ряд был получен на независимом материале, образованном гидрометеорологическими данными, которые не использовались при разработке методики. Однако в ряде случаев и, в частности, при проверке методик долгосрочного прогнозирования такие данные отсутствуют или имеются в недостаточном количестве. В таких случаях величину S приходится оценивать на зависимом материале, использовавшемся при разработке проверяемой методики [6, 10, 18]. Методы получения оценок среднеквадратической погрешности гидрологических прогнозов изложены в следующем разделе.

1.5. Оценка эффективности гидрологических прогнозов

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 [30, 33].

Для выпускаемых один раз в год долгосрочных прогнозов в качестве такой безусловной альтернативы рассматривается климатический прогноз. Климатический прогноз гидрологической характеристики Y выражается

ее нормой \bar{Y} , рассчитанной по тем же данным многолетних наблюдений, которые использовались для получения ряда проверочных прогнозов. В данном случае в качестве погрешности σ_A альтернативного метода рассматривается среднеквадратическая погрешность σ климатического прогноза.

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 часов или суток инерционный прогноз $\tilde{Y}_I(t)$ для момента времени (суток) t использует известное на дату его составления значение $Y(t - \Delta t)$ и учитывает среднее изменение прогнозируемой величины за время Δt . В данном случае в качестве погрешности σ_A альтернативного метода рассматривается среднеквадратическая погрешность σ_Δ инерционного прогноза.

Для среднесрочных прогнозов выбор в качестве альтернативы 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 [6].

Согласно части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 г. эффективность методики прогнозирования характеризуется отношением S/σ_A , чем оно ниже, тем выше эффективность прогнозов. При достаточном количестве проверочных прогнозов методика относится к категории хороших при условии $S/\sigma_A \leq 0,50$; к категории удовлетворительных при условии $0,50 < S/\sigma_A \leq 0,80$ и к категории неудовлетворительных при условии $S/\sigma_A > 0,80$ [30].

В дополнение к отношению S/σ_A в отечественной практике учитывается оправдываемость прогнозов P , которая равна частоте случаев, когда ошибка прогнозов по абсолютной величине не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_A$ (оправдавшийся прогноз). В целом, по мере снижения отношения S/σ_A оправдываемость прогнозов P возрастает. В частности, при нормальном распределении ошибок прогноза по проверяемой и альтернативной методике соотношению $S/\sigma_A = 0,80$ соответствует величина $P = 60 \%$, а соотношению $S/\sigma_A = 0,50$ соответствует величина $P = 82,5 \%$.

В настоящее время в большинстве стран мира, а в последние годы и в России, качество моделирования гидрологических процессов и их прогнозирования принято характеризовать показателем Нэша – Сатклиффа [56]. Фактически этот показатель эквивалентен отношению S/σ , так как он выражается приближенной формулой:

$$NSE = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2}. \quad (3)$$

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. Однако он совершенно не подходит для оценки эффективности краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов, для которых в качестве альтернативы используется инерционный прогноз [6, 14, 18].

2. Анализ рядов проверочных прогнозов

2.1. 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 $N = nT$.

Систематическая погрешность прогноза характеризуется показателем

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i). \quad (4)$$

Значительное отличие этого показателя от нуля свидетельствует о систематическом завышении или занижении прогнозируемой величины и указывает на необходимость соответствующей корректировки прогноза [6].

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:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (5)$$

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 [6, 10, 48, 59].

Подробное изложение методов оценки погрешности прогнозов и анализ надежности этих методов в различных ситуациях содержатся в работах [6, 10]. В последующем изложении рассматривается применение четырех из них.

Для оценки определяемой формулой (1) 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:

$$S^2 = \frac{(n-1)}{(n-k)(n-k-1)} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2. \quad (6)$$

Формула (6) 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 удовлетворительный результаты практически для любых схем получения долгосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока [6].

Метод 2

Данный метод «выбрасываемой точки» (Jackknife Method Дж.В. Тьюки) является универсальным, однако более трудоемким [6, 10, 59]. 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 лет $i = 1, \dots, n$ 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:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_{(i)})^2. \quad (7)$$

Для оценки определяемой формулой (2) погрешности краткосрочных и среднесрочных прогнозов, выпускаемых ежедневно в течение периода продолжительностью T суток, целесообразно применение двух методов, рассмотренных ниже.

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 [6]. Она основан 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.

Метод 3

Данный метод (Cross-Validation Method, метод перекрестной проверки) является наиболее простым и часто используемым [6, 10]. 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 [33], длина обучающего ряда должна составлять не менее 20 % длины обучающего ряда. При этом обязательно 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 контролируемый ряд годы имели номера $i = 1, \dots, n_K$, то полученная методом 3 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{n_K T} \sum_{i=1}^{n_K} \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_i(t)]^2. \quad (8)$$

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 $i = 1, \dots, n$ [6]. Полученная методом 4 оценка погрешности прогноза определяется формулой:

$$S^2 = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \tilde{Y}_{(i)}(t)]^2. \quad (9)$$

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 [7]. 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 для каждого месяца и всего года в целом помещены оценки среднеквадратической погрешности $S \text{ м}^3/\text{с}$ прогноза расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи, полученные методами 3 и 4.

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

Таблица 1. Оценки погрешности прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

Table 1. Error estimates of forecasts of average daily streamflow at the river Sochi near Sochi

Метод	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
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
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

2.2. Коррекция прогнозов

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 в работе [13] предложен 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:

$$\tilde{Y}_C = m(Y) + R \frac{\sigma(Y)}{\sigma(\tilde{Y})} [\tilde{Y} - m(\tilde{Y})]. \quad (10)$$

Скорректированный по формуле (10) 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 [13].

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:

$$S_C = \sigma(Y)\sqrt{1-R^2}. \quad (11)$$

Формула (11) 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} [13].

Пример 3

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) [18, 54]. 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 (10) помещены в табл. 2.

Таблица 2. Коррекция прогнозов расхода воды для рек бассейна Оки
Table 2. Correction of streamflow forecasts of rivers in the Oka basin

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, допускавшихся при прогнозировании расходов воды с помощью модели DWAT.

2.3. Сравнение погрешностей прогнозов по конкурирующим методикам

В практике гидрологического прогнозирования нередко встречаются ситуации, когда для одной и той же характеристики гидрологического режима водного объекта Y могут использоваться несколько методик ее прогноза с одинаковой заблаговременностью. В подобных ситуациях возникает необходимость выбора наиболее точной из них. В таких ситуациях должна решаться задача выявления статистически достоверного различия между оценками погрешности различных методик прогноза. Сравнение методик следует выполнять попарно, поэтому ниже рассматривается сравнение двух конкурирующих методик, в соответствии с которыми выпускается прогноз \tilde{Y}_1 и \tilde{Y}_2 . Сравнение выполняется на основе статистического анализа полученных для этих рядов ошибок проверочных прогнозов $Y_i - \tilde{Y}_{1,i}$ и $Y_i - \tilde{Y}_{2,i}$, где i – номер проверочного прогноза. Необходимо отметить, что сравнение методик должно производиться за одни и те же сроки (сутки, годы) и, следовательно, длина рядов для этих методик должна быть одинаковой. Только в этом случае обе методики будут поставлены в равные условия.

На первом этапе необходимо сравнивать оценки S_1 и S_2 среднеквадратической погрешности методик, полученных одним из методов, которые изложены в работах [6, 10, 18]. При этом необходимо различать два случая.

1) Сравниваются методики ежегодного получения долгосрочного или среднесрочного прогноза один раз в год. Для обеих методик анализируются ряды n проверочных прогнозов за n лет.

2) Сравниваются методики ежегодного получения краткосрочного или среднесрочного прогноза в течение некоторого периода (фазы гидрологического режима или всего года) продолжительностью T . Для обеих методик анализируются ряды $N = nT$ проверочных прогнозов за n лет.

1. В первом случае предположим, что оценка среднеквадратической погрешности первой методики оказалась меньше. Ввиду ограниченности ряда проверочных прогнозов обе оценки S_1 и S_2 являются приближенными. Неравенство $S_1 < S_2$ ещё не означает достоверного преимущества первой методики, так как может быть обусловлено статистическими погрешностями определения сравниваемых величин.

Сравнение методик затрудняется тем, что между ошибками прогноза $Y_i - \tilde{Y}_{1,i}$ и $Y_i - \tilde{Y}_{2,i}$ при $i = 1, \dots, n$ за один и тот же год может иметь место весьма значительная корреляция. Она обусловлена общим фактическим значением прогнозируемой величины Y_i , наличием у обеих методик одинаковых или сильно коррелированных между собой предикторов. Существенный вклад в корреляцию между ошибками прогноза вносят неучтенные обеими методиками факторы, определяющие прогнозируемую

характеристику. К числу таких факторов, прежде всего, относятся погодные условия в период заблаговременности прогноза. В связи с этим должна быть учтена стандартная оценка r коэффициента корреляции между ошибками прогноза $Y_i - \tilde{Y}_{1,i}$ и $Y_i - \tilde{Y}_{2,i}$ при $i = 1, \dots, n$. Опыт показывает, что практически всегда оценка r статистически достоверно превышает нуль [6, 18].

Для решения вопроса о статистической достоверности неравенства $S_1 < S_2$ в работе [6] предложен критерий, согласно которому это неравенство следует признать статистически достоверным, а первую методику прогноза – явно более точной при уровне значимости (вероятности ошибочного вывода) α , если выполняется неравенство:

$$B = n \ln \left[1 + \frac{(S_2^2 - S_1^2)^2}{4S_1^2 S_2^2 (1 - r^2)} \right] > \chi_1^2(\alpha), \quad (12)$$

где $\chi_1^2(\alpha)$ – квантиль хи-квадрат распределения с одной степенью свободы, соответствующий вероятности превышения α . При использовании неравенства (6) рекомендуется использовать уровень значимости $\alpha = 5\%$, при котором $\chi_1^2(5\%) = 3,84$.

Следует обратить внимание на то, что при увеличении коэффициента r левая часть неравенства (12) возрастает. Это свидетельствует о том, что при высокой корреляции между ошибками прогноза по сравниваемым методикам даже небольшое на первый взгляд преимущество одной из них становится статистически достоверным.

2. Во втором случае также предположим, что оценка среднеквадратической погрешности первой методики оказалась меньше. Как и в первом случае, неравенство $S_1 < S_2$ ещё не означает достоверного преимущества первой методики, так как может быть обусловлено статистическими погрешностями определения сравниваемых величин. При сравнении рядов проверочных прогнозов $Y_i - \tilde{Y}_{1,i}$ и $Y_i - \tilde{Y}_{2,i}$ для всех $i = 1, \dots, N$ необходимо учитывать не только корреляцию между рядами проверочных прогнозов, но и наличие возможной автокорреляции в каждом из них. Между ошибками прогноза за смежные сроки, например сутки каждого периода продолжительностью T , может быть достаточно высокая автокорреляция. В этом случае число проверочных прогнозов N дает завышенное представление о реальном объеме информации, в них содержащейся. В связи с этим в работе [6] предложено учитывать наибольшую из оценок коэффициента корреляции $r(1)$ между ошибками прогноза за смежные сроки прогнозируемого периода, полученных для каждой из методик, и рассчитывать реальное число независимых прогнозов по формуле:

$$N_r = n \left\{ 1 + (T - 1) \left[\frac{1 - r^2(1)}{1 + r^2(1)} \right] \right\}. \quad (13)$$

При отсутствии автокорреляции в рядах ошибок проверочных прогнозов, то есть при $r(1) = 0$, реальное число независимых прогнозов N_r совпадает с величиной $N = nT$. По мере роста коэффициента автокорреляции $r(1)$ до единицы реальное число независимых прогнозов N_r приближается к числу лет n .

Использование реального числа независимых проверочных прогнозов N_r позволяет описанным выше способом сравнивать конкурирующие методики ежегодного получения ее краткосрочного или среднесрочного прогноза в течение периода продолжительностью T .

Неравенство $S_1 < S_2$ следует признать статистически достоверным, а первую методику прогноза – явно более точной при уровне значимости критерия α , если выполняется неравенство (12), в которое вместо числа лет n следует подставить реальное число независимых проверочных прогнозов N_r .

2.4. Сравнение оправдываемости прогнозов по конкурирующим методикам

На втором этапе необходимо сравнить значения P_1 и P_2 оправдываемости прогнозов, которая равна частоте оправдавшихся проверочных прогнозов. При этом также необходимо различать два рассмотренных выше случая.

1. В первом случае оправдавшимися считаются прогнозы, для которых абсолютное значение ошибки не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674\sigma$, которая в данном случае определяется среднеквадратической погрешностью климатического прогноза σ [31]. Предположим, что первая методика имеет более высокую оправдываемость прогнозов. Ввиду ограниченности ряда проверочных прогнозов обе оценки P_1 и P_2 являются приближенными. Неравенство $P_1 > P_2$ ещё не означает достоверного преимущества первой методики, так как может быть обусловлено статистическими погрешностями определения сравниваемых величин.

При сравнении величин P_1 и P_2 необходимо учитывать частоту $P_{1,2}$ оправдавшихся прогнозов одновременно для обеих методик.

Для решения вопроса о статистической достоверности неравенства $P_1 > P_2$ в работе [6] предложен критерий, согласно которому это неравенство следует признать статистически достоверным, а первую методику прогноза – явно более точной при уровне значимости (вероятности ошибочного вывода) α , если выполняется неравенство:

$$M = \frac{\sqrt{n}(P_1 - P_2)}{\sqrt{P_1(1 - P_1) + P_2(1 - P_2) - 2(P_{1,2} - P_1P_2)}} > t(\alpha), \quad (14)$$

где $t(\alpha)$ – квантиль нормального распределения вероятностей с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, соответствующий вероятности превышения α . Значения частот P_1 , P_2 и $P_{1,2}$ в формулу (14) следует подставлять не в процентах, а в сотых долях [6]. При использовании неравенства (8) рекомендуется использовать уровень значимости $\alpha=5\%$, при котором $t(5\%) = 1,64$.

2. Во втором случае оправдавшимися считаются прогнозы, для которых абсолютное значение ошибки не превышает допустимую величину $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_{\Delta}$, которая в данном случае определяется среднеквадратической погрешностью инерционного прогноза σ_{Δ} [31]. Предположим, что первая методика также имеет более высокую оправдываемость прогнозов.

Использование определяемого формулой (13) реального числа независимых проверочных прогнозов N_r позволяет описанным выше способом сравнивать оправдываемость конкурирующих методик ежегодного получения ее краткосрочного или среднесрочного прогноза в течение периода продолжительностью T . Неравенство $P_1 > P_2$ следует признать статистически достоверным, а первую методику прогноза – явно более точной при уровне значимости критерия α , если выполняется неравенство (14), в которое вместо числа лет n следует подставить реальное число независимых проверочных прогнозов N_r .

2.5. Статистически обоснованная оценка эффективности прогнозов

Изложенные правила, сформулированные в части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 года, весьма приблизительно решают вопрос о статистической достоверности неравенства $S < \sigma_A$, то есть преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом. В них недостаточно детально учитывается число 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 работе [6] предложены правила оценки эффективности проверяемой методики, основанные на критериях проверки статистической достоверности преимущества проверяемой методики перед альтернативным прогнозом с учетом продолжительности ряда проверочных прогнозов и корреляции между синхронными ошибками прогнозов по сравниваемым методикам.

Эти критерии совпадают с вышеизложенными, если рассматривать в качестве первой оцениваемую методику со среднеквадратической погрешностью прогнозов $S_1 = S$ и их оправдываемостью $P_1 = P$, а в качестве

второй – альтернативный прогноз со среднеквадратической погрешностью прогнозов $S_2 = S_A$ и их оправдываемостью $P_2 = P_A$. При решении данной задачи также необходимо различать случаи, когда прогнозы выпускаются один раз в год или в течение определенного периода.

Пример 4

Для разработанной в ФГБУ «Гидрометцентр России» методики краткосрочного прогнозирования ежедневных расходов воды реки Ока у г. Калуга в течение всего года с заблаговременностью 3 суток с использованием южнокорейской гидрологической модели формирования речного стока DWAT и российской метеорологической модели COSMO-Ru показатель эффективности $S/\sigma_\Delta = 0,81$ оказался неудовлетворительным. 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 $r(1) = 0,84$ [18]. Рассчитанный по формуле (12) показатель B равен 4,82. Следовательно, использование данного статистически более обоснованного показателя эффективности методики прогноза позволяет признать ее удовлетворительной.

Пример 5

В целях долгосрочного прогнозирования месячного притока воды в Цимлянское водохранилище в течение маловодного периода года использован метод, разработанный в Гидрометцентре России. По результатам его проверки за период с 1985 по 2018 год минимальная оправдываемость прогнозов, равная 66 %, получена для февраля и оказалась весьма невысокой. Оправдываемость используемого в качестве альтернативы климатического прогноза для этого месяца равна 53 %, а частота одновременно допустимых ошибок климатического прогноза и прогноза по проверяемому методу равна $P_{1,2} = 48$ % [18]. Рассчитанный по формуле (14) показатель M равен 2,11. Следовательно, условие (14) выполняется, неравенство $P > P_A$ является статистически достоверным, а проверяемый метод имеет достаточно высокую оправдываемость прогнозов.

Таким образом, при наличии нескольких методик прогнозирования гидрологической характеристики некоторого водного объекта с одинаковой заблаговременностью предлагаемые рекомендации позволяют делать статистически обоснованный выбор наиболее точной из них с точки зрения среднеквадратической погрешности прогнозов и их оправдываемости.

Одновременно предлагаемые правила позволяют делать статистически обоснованный вывод об эффективности проверяемой методики гидрологического прогнозирования по сравнению с альтернативным прогнозом.

3. Факторы, лимитирующие надежность и заблаговременность гидрологических прогнозов

3.1. Обзор основных лимитирующих факторов и путей снижения их негативного воздействия

Возможности гидрологического прогнозирования, его заблаговременности и точности ограничены следующими факторами:

1) многофакторностью процессов формирования гидрологического режима водных объектов, усложняющейся в условиях современных и ожидаемых климатических изменений и возрастающей антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы;

2) качеством используемых методик гидрологического прогнозирования, включая их научную обоснованность, информационную обеспеченность и уровень анализа используемой гидрометеорологической информации;

3) своевременностью доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей;

4) неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и ограниченными возможностями их прогнозирования;

5) уровнем мониторинга этих процессов, включая конфигурацию наземной сети гидрометеорологических наблюдений, их состав и точность, а также располагаемые средства дистанционного зондирования [6, 18, 51].

Негативное воздействие первого фактора будет сохраняться и может снижаться за счет развития фундаментальных гидрологических исследований, включая совершенствование экспериментальной базы гидрологических исследований, позволяющих углубленно изучать детали различных гидрологических процессов, взаимодействие их характеристик между собой и с другими факторами [18].

В рамках теории и практики гидрологического прогнозирования имеются и постоянно возрастают возможности снижения негативного воздействия следующих двух факторов путем повышения качества методик гидрологического прогнозирования и своевременности доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей.

В настоящее время перспективы повышения научного уровня гидрологического прогнозирования в наибольшей степени связываются с разработкой и внедрением различных моделей гидрологических процессов. Следует отметить, что четкое разделение моделей затруднено в связи тем, что одни компоненты гидрологической модели могут быть основаны на концептуальном подходе, в то время как другие – на эмпирических зависимостях. Широко используемые в прогнозах речного стока емкостные модели как раз занимают такое промежуточное положение [11]. Специфика гидрологического прогнозирования предъявляет определенные требования к математическим моделям: они должны включать как можно меньшее число

плохо прогнозируемых метеорологических величин, быть не очень чувствительными к погрешностям исходных данных и легко настраиваться при изменении объема входной информации. В связи с этим в прогностической практике в основном обращаются к достаточно гибким концептуальным моделям, а для некоторых задач – к эмпирическим моделям. В последнее десятилетие происходит непрерывный рост доступной гидрометеорологической информации, включая спутниковую информацию, данные метеорологических радиолокаторов и автономных регистрирующих систем, детальные данные реанализа и данных учащенных наблюдений с наблюдательных сетей. В этих условиях в ведущих гидрометеорологических службах в практике гидрологических прогнозов распространение получают развитые модели с распределенными параметрами, занимающие промежуточное положение между концептуальными и физико-математическими моделями [18, 46; 49].

Повышению научного уровня гидрологического прогнозирования способствует разработка и внедрение ГИС-технологий, позволяющих учесть особенности конкретного водного объекта, уровень гидрометеорологической изученности его водосбора и с максимальной эффективностью использовать данные наземной сети Росгидромета и средств дистанционного зондирования [18].

Определенные надежды связываются с использованием методов искусственного интеллекта, с помощью которых моделируются и воспроизводятся с помощью компьютерных программ процессы восприятия информации, поиска закономерностей, получения выводов и принятия решений. Важнейшим достоинством этих методов является их способность к использованию постоянно возрастающего набора гидрометеорологических и геофизических данных.

Повышение своевременности, эффективности и надежности доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей связано с разработкой и внедрением автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов, которые позволяют существенно облегчать и ускорять подготовку и выпуск гидрологических прогнозов. Такие системы основаны на обработке исходной гидрометеорологической информации посредством систем управления базами данных и на математических моделях формирования стока, реализованных в виде автоматизированных программных средств. Отдельного внимания заслуживают системы раннего предупреждения о паводках и наводнениях. Совершенствование таких систем отвечает растущим потребностям населения и отраслей экономики в условиях наблюдаемого роста количества и интенсивности опасных природных явлений [18].

Снижение неопределенности хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологических прогнозов может быть обеспечено путем повышения точности и заблаговременности метеорологических прогнозов.

Повышение уровня мониторинга гидрометеорологических процессов связано с совершенствованием системы Росгидромета.

Влияние этих двух последних факторов рассмотрено ниже.

3.2. Неопределенность метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологических прогнозов

Многие методы получения гидрологических прогнозов предполагают хотя бы косвенный учет изменения метеорологических элементов (осадки, температура воздуха, испарение) в течение периода их заблаговременности. Неопределенность погодных условий в период заблаговременности гидрологического прогноза является его наиболее уязвимым местом, дает существенный, а иногда решающий вклад в его погрешность, а в ряде случаев ограничивает его заблаговременность [6, 30, 37, 52].

В краткосрочных гидрологических прогнозах данная неопределенность частично устраняется с помощью метеорологических прогнозов, однако эти прогнозы имеют погрешность, которая возрастает с ростом их заблаговременности.

Одной из наиболее хорошо себя зарекомендовавших является оперативная система COSMO-Ru регионального краткосрочного численного прогноза погоды для территории России и прилегающих регионов, которая разработана в ФГБУ «Гидрометцентр России». Она 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 [3, 20]. Анализ результатов прогнозирования суточного слоя осадков и среднесуточной приземной температуры воздуха с помощью данной системы за период с 04.07.2013 по 31.12.2020 позволил оценить коэффициенты корреляции R между фактическими значениями и их прогнозами с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Анализировались три варианта:

– вариант 1 с прогнозированием слоя осадков и температуры воздуха для каждой из 2081 рассматриваемых метеорологических станций;

– вариант 2 с прогнозированием этих элементов, осредненных для каждого из 590 выбранных речных бассейнов;

– вариант 3 с прогнозированием этих элементов, осредненных для речных бассейнов с площадью не менее 100.000 км².

В табл. 3 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. Средние значения коэффициентов корреляции R для каждого из трех вариантов

Table 3. Average values of correlation coefficients for each of the three options

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. В то же время эти данные свидетельствуют об ограниченности возможностей прогнозирования суточного слоя осадков даже с заблаговременностью одни сутки [18].

Использование моделей формирования речного стока позволяет оценить вклад неопределенности хода метеорологических элементов за период заблаговременности в погрешность гидрологических прогнозов. С этой целью определяется среднеквадратическая погрешность гидрологического прогноза $S(\Delta t)$ с заблаговременностью Δt , содержащая вклад полной или частично устраненной с помощью метеорологических прогнозов неопределенности погодных условий периода заблаговременности. Она сравнивается со среднеквадратической погрешностью модельных расчетов S_0 , полученных в результате усвоения моделью фактического хода метеорологических элементов за период заблаговременности. Соотношение $S(\Delta t)/S_0$ характеризует вклад неопределенности хода метеорологических элементов за период заблаговременности в погрешность гидрологического прогноза [17, 18].

Пример 6

Для рек бассейна Камы в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ суток. В методике используется шведская концептуальная модель формирования речного стока HBV-96. Для периода заблаговременности гидрологического прогноза используются полученные с помощью российской метеорологической модели COSMO-Ru ожидаемые значения температуры воздуха и осадков [18]. В табл. 4 для 9 створов бассейна Камы приведены названия рек и пунктов с гидрологическими постами, а также соотношение $S(\Delta t)/S_0$ при $\Delta t = 1, 2, 3$ суток.

Таблица 4. Значения отношения $S(\Delta t)/S_0$ для прогнозов стока рек бассейна Камы различной заблаговременности Δt суток

Table 4. Ratio values for forecasts of river flow in the Kama basin at different times of day

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

Приведенные данные демонстрируют рост влияния ошибок метеорологических прогнозов на погрешность прогнозов речного стока с увеличением их заблаговременности.

Современные достижения в области сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик пока не дают оснований для их регулярного использования в долгосрочных прогнозах речного стока [48, 58]. В связи с этим использование моделей формирования речного стока в долгосрочных и среднесрочных прогнозах его характеристик сопровождается применением ансамблевого подхода, который предусматривает усвоение моделью наблюдавшихся в прошлом сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и усреднение полученных результатов [27, 29, 49]. Соотношение S/S_0 между среднеквадратической погрешностью такого прогноза S с погрешностью расчета S_0 , использующего фактический ход метеорологических элементов, аналогичным образом характеризует вклад неопределенности хода метеорологических элементов за период заблаговременности в погрешность гидрологического прогноза [17, 18].

Пример 7

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 г., то есть $n = 33$ [9]. В табл. 5 приведены показатели погрешности расчетов S_0 и прогнозов S объема незарегулированного притока воды в Чебоксарской водохранилище за второй квартал W_{II} км³ и максимального расхода этого притока Q_{\max} м³/с.

Таблица 5. Показатели погрешности расчетов и прогнозов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

Table 5. Error indicators for calculations and forecasts of spring water inflow into the Cheboksary Reservoir

Характеристика	S	S_0	S/S_0
W_{II} км ³	5,32	2,81	1,89
Q_{\max} м ³ /с	2539	1163	2,18

Приведенные 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 второго квартала и дождями в его конце [23].

3.3. Влияние конфигурации наземной наблюдательной сети на точность гидрологических прогнозов

Наземная гидрометеорологическая сеть Росгидромета включает сеть гидрологических постов, сеть метеорологических станций и постов, сеть снегомерных маршрутов и сеть агрометеорологических станций. Конфигурация сети определяется количеством станций или постов, их расположением и составом наблюдений. Поступающие с этой сети данные являются информационной базой для прогнозирования элементов гидрологического режима водных объектов, надежность и своевременность которого является важным фактором обеспечения эффективного и безопасного функционирования водохозяйственного комплекса страны [24, 31, 37, 50].

Наиболее жесткие требования к конфигурации наземной наблюдательной сети гидрометеорологических наблюдений предъявляются при использовании физико-математических моделей с распределенными параметрами. Успешность их применения в значительной степени зависит

от точности описания пространственно-временной изменчивости характеристик процессов, определяющих прогнозируемые величины. В частности, точность получаемых гидрологических прогнозов зависит от среднего расстояния от произвольно выбранной точки водосбора до ближайшего к ней пункта наблюдений [18, 29, 44].

При использовании физико-статистических зависимостей или концептуальных моделей с сосредоточенными параметрами используются осредненные по территории характеристики важнейших гидрологических процессов. В частности, для долгосрочного прогнозирования весеннего стока или притока воды в водохранилища используются средние для водосбора значения максимальных запасов воды в снежном покрове и ледяной корке, влажности и глубины промерзания почвы перед началом снеготаяния [35]. Количественная оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность таких прогнозов дана в работе [12].

В общем случае влияние конфигурации наблюдательной сети на точность гидрологических прогнозов определяется репрезентативностью и точностью проводимых гидрометеорологических наблюдений, числом пунктов наблюдения, равномерностью их распределения по территории водосбора и синхронностью колебаний используемой в схеме получения прогноза характеристики в этих пунктах. Чем выше эти показатели, тем точнее прогноз. Это обусловлено следующими обстоятельствами.

1. Недостаточная репрезентативность наблюдений, проводимых на гидрологических постах, сети метеорологических станций и постов, сети снегомерных маршрутов и сети агрометеорологических станций, означает отсутствие информации о важных характеристиках процессов, определяющих прогнозируемую величину.

2. Наблюдения всегда содержат погрешности, которые могут быть весьма значительными и определяются техническими возможностями приборов и самих методик измерений [28, 31, 50]. Даже для прогнозируемой гидрологической характеристики вероятные ошибки ее определения могут быть весьма большими. Подобная ситуация характерна при определении расходов воды на реках с широкой заросшей поймой и для горных рек с сильно изменяющимися кривыми расходов [28].

3. Малое число пунктов наблюдений в сочетании со значительной пространственной изменчивостью используемой характеристики затрудняет правильный учет ее пространственного распределения в моделях с сосредоточенными параметрами и снижает точность прогнозов, использующих ее усредненное значение.

4. Аналогичные негативные последствия возникают в типичной для горных регионов ситуации, когда пункты наблюдения характеризуют лишь часть водосбора и отсутствуют на другой его значительной части. Подобная ситуация характерна для горных регионов, где пункты наблюдений, как правило сосредоточены в нижней, более доступной части водосбора и отсутствуют высоко в горах [7].

5. При высокой корреляции колебаний используемой характеристики в различных пунктах все проводимые в них наблюдения дают практически одну и ту же информацию. В этом случае достаточно верное представление об изменчивости используемой характеристики во времени дают наблюдения даже в одном пункте, и для получения общей картины колебаний этой характеристики в пределах всего водосбора достаточно провести дополнительный географический анализ и внести дополнительные параметры в методику прогнозирования.

Таким образом, совершенствование сети гидрометеорологических наблюдений является актуальной и важной задачей. Ее решение должно включать открытие новых станций и постов, закрытие нерепрезентативных, восстановление ранее действовавших, изменение состава наблюдений, повышение их репрезентативности и точности. Результаты наземных наблюдений необходимо все больше дополнять данными постоянно совершенствующегося дистанционного зондирования, включая спутниковую информацию [1, 4, 24, 32].

В ряде случаев возможности адекватного описания процессов, определяющих прогнозируемую гидрологическую характеристику, могут быть ограничены недостатком или отсутствием необходимой информации, которая не может быть получена из данных наземной гидрометеорологической сети. Например, даже при использовании достаточно детальных моделей формирования речного стока для краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды на реках именно нехватка информации о гидравлических характеристиках русловой сети вынуждает отказаться от системы уравнений Сен-Венана и описывать процесс трансформации руслового стока с помощью известного интеграла Дюамеля. Его использование предполагает постоянство времени бассейнового добега при прохождении паводков любой высоты, что не соответствует действительности и приводит к известному смещению прогнозируемых гидрографов по сравнению с фактическими. Кроме того, интеграл Дюамеля не учитывает возникновение подпора в узлах слияния. Тем не менее, при разработке прогностических моделей данному подходу редко удается найти альтернативу [25, 26, 55, 60]. В то же время достаточно простое и эффективное решение описания трансформации руслового стока дает используемый уже в течение многих десятилетий метод соответственных уровней [35].

Рассмотренные выше основные факторы, ограничивающие достижимую заблаговременность и точность гидрологического прогнозирования, должны учитываться еще на стадии выбора метода прогнозирования заданной гидрологической характеристики. На последующем этапе уже при выборе оптимальной методики прогнозирования этой характеристики для конкретного водного объекта необходимо проводить сравнение результатов проверочных прогнозов, получаемых с помощью существующих и разрабатываемых способов решения поставленной задачи. Такое сравнение рекомендуется производить методами, изложенными в следующем разделе.

4. Выбор методов прогнозирования речного стока

4.1. Экономический аспект выбора методов прогнозирования

Научно обоснованное планирование и эффективное проведение мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных гидрологических явлений требует достаточно надежных оценок ожидаемых характеристик гидрологического режима водных объектов в течение определенного периода времени [21, 47, 51]. В качестве таких оценок используются гидрологические прогнозы различной заблаговременности [2, 41]. 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. Это снижение выражается недополученной прибылью или дополнительным ущербом, которые будут неизбежно возрастать по мере развития экономики [40, 47, 57]. В связи с этим применение оптимального метода гидрологического прогнозирования должно давать максимальную экономическую эффективность. Разумеется, об экономической эффективности не может идти речи, когда прогнозы используются при организации и проведении мероприятий по спасению человеческих жизней в экстремальных гидрологических ситуациях [41]. Для остальных случаев целесообразно обратить внимание на экономический аспект гидрологического прогнозирования как варианта информационной технологии [27].

Рассмотрим суммарный экономический эффект от мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от опасных гидрологических явлений в течение некоторого расчетного периода времени для конкретного водного объекта (участка реки, озера, водохранилища). Обозначим через E_0 его значение, получаемое без использования прогнозов гидрологического режима этого объекта. Подобный вариант часто имеет место при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, когда, например, управление режимом работы водохранилища осуществляется только по диспетчерским графикам [2]. Обозначим через E экономический эффект, получаемый при использовании некоторой методики гидрологического прогнозирования. При достаточной научной обоснованности мероприятий величина E превосходит величину E_0 , а их разность $\Delta E = E - E_0$ определяет экономический эффект от использования рассматриваемой методики гидрологического прогнозирования. Величина ΔE возрастает с увеличением точности и заблаговременности прогнозов [6, 40]. Ее определение представляет весьма непростую задачу, которая, однако, уже решается при оценке экономической эффективности метеорологических прогнозов [22].

Экономический эффект от использования методики гидрологического прогнозирования необходимо сравнивать с затратами C на ее разработку

и использование в оперативном режиме. Экономическая эффективность этой методики определяется отношением $\Delta E / C$ [22, 27]. Таким образом, если для одной и той же характеристики гидрологического режима некоторого водного объекта могут использоваться несколько конкурирующих методик ее прогноза, то в качестве оптимальной следует выбирать методику, которая имеет максимальную экономическую эффективность $\Delta E / C$.

Ввиду сложности, а порой и невозможности определения экономической эффективности каждой из конкурирующих методик целесообразно рассмотреть следующие упрощенные варианты оптимизации.

1) Если все конкурирующие методики дают прогнозы с одинаковой заблаговременностью Δt и требуют одинаковых затрат C на их разработку и использование в оперативном режиме, то оптимальной окажется методика, позволяющая получать прогнозы с минимальной среднеквадратической погрешностью S .

2) Если конкурирующие методики требуют приблизительно одинаковых затрат C на их разработку и использование, а согласно изложенным в разделе 3 критериям разница между среднеквадратическими погрешностями S их прогнозов не является статистически достоверной, то предпочтение следует отдать методике с наибольшей заблаговременностью прогноза Δt .

3) Если конкурирующие методики дают прогнозы с приблизительно одинаковой заблаговременностью Δt , а разница между среднеквадратическими погрешностями S их прогнозов не является статистически достоверной, то предпочтение следует отдать методике, требующей минимальных затрат C на ее разработку и использование.

Экономическое обоснование выбора одного из общих методов гидрологического прогнозирования затруднено тем, что на основе каждого из них может быть разработано много конкретных схем получения прогнозов для разных водных объектов, и эти схемы (методики) будут иметь разную экономическую эффективность. Может оказаться, что для одних регионов или групп водных объектов более эффективными будут методики прогнозирования, основанные на одном методе, а на других регионах или групп водных объектов – на другом. В этих условиях выбор оптимального метода гидрологического прогнозирования должен осуществляться на основе учета рассмотренных в разделе 2 факторов, лимитирующих точность и заблаговременность получаемых с его помощью прогнозов.

Тем не менее при сравнении различных методов, предназначенных для решения одной и той же задачи гидрологического прогнозирования, экономический аспект все же имеется, и связан он с затратами на разработку и использование в оперативном режиме основанных на этих методах конкретных схем получения прогнозов. Среднее значение этих затрат будет минимальным для метода гидрологического прогнозирования, который удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) метод позволяет получать прогнозы для многих водных объектов в пределах достаточно большой территории;
- 2) метод позволяет сформировать единую базу необходимой гидрометеорологической информации;
- 3) метод позволяет автоматизировать калибровку параметров, входящих в схему получения прогнозов;
- 4) метод позволяет автоматизировать подготовку и выпуск прогнозов, а также своевременное доведение прогностической продукции до потребителей [18].

Таким образом, наиболее экономичным является метод гидрологического прогнозирования, на основе специально разработанного комплекса программного обеспечения допускающий массовую реализацию в автоматизированном режиме. Примеры таких методов приведены ниже.

4.2. Методы, допускающие массовую реализацию в автоматизированном режиме

За последние годы в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны два дополняющих друг друга метода прогнозирования речного стока.

1. Для ежедневного получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды с заблаговременностью до 10 суток в течение всего года разработан метод экстраполяции гидрографа [11, 15, 16, 18]. В этом методе прогнозируемая величина линейно выражается через ее наблюдавшиеся значения, соответствующие дате составления прогноза и пяти предыдущим суткам. Для каждой заблаговременности прогноза параметры линейной зависимости оцениваются методом наименьших квадратов по данным многолетних гидрометрических наблюдений. Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты расчета по таким зависимостям ограничиваются сверху и снизу допустимым минимумом и допустимым максимумом, определяемым по многолетнему ряду значений уровня или расхода воды.

Данный метод реализован для расположенных по всей территории России речных створов, оборудованных гидрологическими постами – 2776 створов для уровней, 2098 для расходов воды. Его возможности демонстрирует табл. 6, в которой для всех значений заблаговременности Δt суток приведено число речных створов, для которых получены хорошие и удовлетворительные прогнозы расходов Q и уровней воды H с показателем эффективности $S / \sigma_{\Delta} < 0,80$ и оправдываемостью $P > 60$ %.

Приведенные данные показывают, что даже с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды для 223 створов. Как и следовало ожидать, метод дает наилучшие результаты для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора, у которых ход среднесуточных расходов и уровней имеет плавный характер [16, 18].

Таблица 6. Число речных створов с хорошими и удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности**Table 6.** Number of river sections with good and satisfactory forecasts at various lead times

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

2. В целях расширения возможностей прогнозирования разработан метод ежедневного получения краткосрочных прогнозов среднесуточных расходов воды с заблаговременностью до 3 суток в течение всего года, основанный на широко используемой в мировой гидрологии шведской концептуальной модели формирования речного стока HBV-96 и разработанной в ФГБУ «Гидрометцентр России» оперативной системы численного прогнозирования погоды COSMO-Ru [18, 39]. В качестве входной информации модель HBV-96 использует осредненные по территории водосбора ежедневные значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и суточного слоя осадков, значения которых для периода заблаговременности прогнозируются с помощью системы COSMO-Ru. На выходе получают ежедневные значения среднесуточных расходов воды в замыкающем речном створе. В целях повышения точности прогнозирования эти значения корректируются с учетом автокорреляции ошибок прогноза по результатам прогнозирования за предыдущие дни. Параметры схемы получения прогноза оцениваются по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений и метеорологических прогнозов с помощью алгоритма SCE-UA перемешивания и эволюции комплексов их значений. Реализация методики расчета среднесуточного расхода воды выполнена на языке программирования Python с привлечением программных модулей Numpy, Pandas, Arcgisscripting, SciPy, Matplotlib [18, 20].

Метод реализован для расположенных почти по всей территории России 590 речных бассейнов, в замыкающих створах которых имелись гидрологические посты. Его возможности демонстрирует табл. 7, в которой для различной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, 2, 3$ суток приведены средние значения показателя эффективности S/σ_{Δ} и относительное число речных бассейнов в процентах, для которых результаты прогнозов относятся к категории хороших ($S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$) и удовлетворительных ($0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$).

Следует обратить внимание на то, что, несмотря на снижение точности прогнозов с ростом их заблаговременности, 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 [18, 38].

Таблица 7. Показатели качества прогнозов по предлагаемой методике
Table 7. Quality indicators of forecasts using the proposed method

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%

На базе описанных выше методов в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана автоматизированная система подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды для речных створов, расположенных практически по всей территории России. Основное назначение системы заключается в поддержке принятия решений гидрологом-прогнозистом при выпуске прогноза и в случае необходимости – штормового оповещения об опасном развитии паводковой обстановки на реках [18].

4.3. Рекомендации по выбору методов и методик гидрологического прогнозирования

По мере развития системы гидрологического прогнозирования при выборе общего метода, то есть общего подхода к получению прогнозов, во все большей степени должна учитываться возможность его использования для многих водных объектов в пределах достаточно большой территории на основе единой информационной базы и автоматизированной системы разработки, подготовки и выпуска прогнозов. Как было отмечено, наличие у метода гидрологического прогнозирования таких свойств обеспечивает ему максимальную экономичность.

С другой стороны, необходимо учитывать, в какой мере рассмотренные в разделе 3 факторы могут ограничивать точность и заблаговременность прогнозов, этим методом получаемых. Возможны следующие ситуации, связанные с уровнем гидрометеорологической изученности водосбора прогнозируемого водного объекта и соответствующие им рекомендации.

Если высокая пространственная изменчивость водосбора сочетается с низким уровнем его гидрометеорологической изученности и, в частности, редкой сетью пунктов наблюдений, рекомендуется отказаться от использования физико-математических моделей с распределенными параметрами.

Если наземная сеть гидрометеорологических наблюдений и данные дистанционного зондирования не дают некоторых важных характеристик

процессов, определяющих прогнозируемую величину, рекомендуется обходиться достаточно простыми концептуальными моделями или эмпирическими формулами, соответствующими имеющемуся уровню гидрометеорологической изученности водосбора.

Если ряды гидрометеорологических наблюдений, необходимые для оценки параметров схемы получения прогноза, имеют недостаточную продолжительность, рекомендуется использовать простейшие варианты математических моделей или эмпирических формул, предусматривающих оценку лишь небольшого числа параметров.

Помимо рассмотренных выше объективных обстоятельств, нередко случаи, когда при выборе метода прогнозирования гидрологи руководствуются чисто субъективными предпочтениями. Наиболее характерно отчасти оправданное предпочтение наиболее современным и, как правило, более сложным методам прогнозирования, детально учитывающим происходящие на водосборе гидрологические процессы и использующим различные математические модели. В последнее время расширяется сфера применения еще более сложных методов искусственного интеллекта. Встречаются случаи, когда подобные предпочтения сочетаются с пренебрежительным отношением к классическим методам, входящим в выпуски 1, 2 и 3 Руководства по гидрологическим прогнозам 1989 года выпуска. Приводимый ниже пример показывает, что подобные предпочтения могут оказаться неоправданными.

Пример 8

В ИВП РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока ECOMAG и с использованием ансамблевого подхода разработана методика долгосрочного прогнозирования объема незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал W_{II} км³ [9]. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза был получен по данным наблюдений с 1967 по 2014 год. Результаты проверочных прогнозов за период с 1982 по 2014 год дали оценки среднеквадратической погрешности $S = 5,3$ км³, показателя эффективности $S/\sigma = 0,56$ и оправдываемости $P = 85\%$.

В настоящее время в ФГБУ «Гидрометцентр России» для тех же целей используется методика, разработанная Е.С. Змиевой, В.Д. Комаровым и В.И. Сапожниковым еще до полного заполнения водохранилища. Методика основана на эмпирических зависимостях и предполагает использование данных измерений запасов воды в снежном покрове, влажности почвы и глубины ее промерзания [23]. Результаты проверочных прогнозов по данной методике за тот же период с 1982 по 2014 год дали оценку среднеквадратической погрешности $S = 3,2$ км³, $S/\sigma = 0,34$ и оправдываемости $P = 97\%$.

Сравнение этих двух методик с помощью критериев, изложенных в предыдущем разделе, показало несомненную статистическую достоверность преимуществ давно разработанной классической методики и дало основание для ее дальнейшего использования в оперативной практике.

Таким образом, разработка и широкое внедрение современных методов прогноза должно сочетаться с анализом результатов их использования в оперативной практике гидрологического прогнозирования. Однако такие результаты могут быть получены не для общего метода, а для основанных на нем конкретных методик, то есть схем получения прогноза заданной гидрологической характеристики для различных водных объектов. При этом уровень гидрометеорологической изученности этих объектов и их водосборов может быть различным, поэтому непосредственно сравниваться могут не методы прогнозирования, а основанные на них конкретные методики, разработанные для одного и того же водного объекта.

Как уже было отмечено в данном разделе, в настоящее время сравнивать экономическую эффективность конкурирующих методик можно при условии, что из трех их характеристик – затрат на разработку и использование методики C , заблаговременности получаемых прогнозов Δt и их среднеквадратической погрешности S – две принимают близкие значения. В противном случае для сравнения методик могут быть рекомендованы только правила статистического анализа полученных для них рядов проверочных прогнозов, изложенные в разделе 2. При этом речь может идти не о экономической эффективности каждой методики, а только о ее эффективности по сравнению с альтернативным (климатическим или инерционным) прогнозом, которая определяется соотношением S/σ_A среднеквадратической погрешности методики S к погрешности альтернативного прогноза σ_A . При этом согласно части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 года этот показатель определяет целесообразность внедрения методики в оперативную практику гидрологического прогнозирования [30].

Использование соотношения S/σ_A в качестве показателя качества методики и целесообразности ее внедрения требует определенной осторожности. Согласно рекомендациям лауреата Нобелевской премии Д. Канемана, при оценке эффективности какой-либо методики прогнозирования следует различать ее верификацию и валидацию. В процессе верификации методики проверяется ее соответствие требованиям разработчика. В процессе валидации методики проверяется ее соответствие требованиям потребителя [53]. Успешность верификации методики определяется показателем S/σ_A . 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 9

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика краткосрочного прогнозирования уровней воды на реке Амур, для которой в летне-осенний период характерно прохождение опасно высоких паводков, приводящих к наводнениям [8, 43]. Использован классический метод соответственных уровней, который позволяет описывать трансформацию волн паводков на отдельных участках реки [35]. В табл. 8 приведены название пунктов – речных створов, для которых прогнозируются уровни воды, 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 8. Показатели качества прогнозов уровней воды на реке Амур
Table 8. Quality indicators of water level forecasts on the Amur River

Пункт	Δt суток	R	S см	S/σ_{Δ}
с. Джалинда	1	0,987	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 показателя S/σ_{Δ} превышают 0,80. Согласно части 1 раздела 3 Наставления по службе прогнозов 1962 года такие прогнозы относятся к категории неудовлетворительных [30]. Однако значения коэффициента корреляции R очень высоки и близки к единице.

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 до 3 суток погрешность инерционного прогноза σ_{Δ} по сравнению с величиной S относительно невелика [8, 43].

Несмотря на неудовлетворительные с точки зрения гидрологов-прогнозистов результаты верификации данной методики, она была передана в МЧС, где получила одобрение и используется для предупреждения об угрозе наводнений на реке Амур.

На основе этой методики в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана «ГИС Амур», которая является системой автоматизированного краткосрочного прогнозирования и мониторинга наводнений на р. Амур и реализована на основе ГИС- и веб-технологий. Ведущим мировым центром по геоинформационным технологиям ESRI (Environmental Systems Research Institute) эта системы была признана «Проектом 2015 года», а ее разработчики получили высшую награду за особые достижения в области применения геоинформационных технологий [18]. Следовательно, при неудовлетворительных результатах верификации методики, ее валидация оказалась вполне успешной.

Таким образом, выбор методики гидрологического прогнозирования 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 потребителем. В свою очередь потребитель при удовлетворяющей его точности прогнозов будет отдавать предпочтение более простым и дешевым методикам их получения [53].

С учетом изложенных обстоятельств, при выборе методики гидрологического прогнозирования рекомендуется исходить из принципа, сформулированного философом Уильямом Оккамом, согласно которому поиск решений какой-либо научной задачи следует начинать с простейших вариантов [5]. Выбор оптимальной методики гидрологического прогноза следует производить путем последовательного перехода от простейшей методики к более сложной [18].

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны рекомендации по выбору методов прогнозирования речного стока, которые содержат следующие положения.

1. Для основных характеристик водного режима рек, озер и водохранилищ дан обзор методов их прогнозирования. Определены показатели качества их прогнозирования, включая заблаговременность, погрешность и эффективность прогнозов, по сравнению с альтернативными методами. Рассмотрены факторы, определяющие качество прогнозирования и пути его повышения.

2. Приведен обзор факторов, лимитирующих надежность и заблаговременность гидрологических прогнозов. Для важнейших из них намечены пути снижения их негативного влияния на качество прогнозов.

3. Дана и на конкретных примерах продемонстрирована количественная оценка влияния на качество гидрологического прогнозирования неопределенности хода метеорологических элементов в период заблаговременности гидрологических прогнозов при наличии и отсутствии достаточно надежных метеорологических прогнозов этих элементов.

4. Рассмотрено влияние конфигурации наземной наблюдательной сети на точность гидрологических прогнозов. Даны рекомендации по выбору методов гидрологического прогнозирования в зависимости от располагаемой гидрометеорологической информации, ее надежности, репрезентативности, пространственно-временного разрешения и продолжительности наблюдений.

5. Для ситуации, в которой для одной и той же характеристики гидрологического режима водного объекта могут использоваться несколько методик ее прогнозирования с одинаковой заблаговременностью, рекомендованы статистические критерии сравнения их качества по результатам проверочных прогнозов. Парное сравнение конкурирующих методик позволяет выявить оптимальный вариант с наилучшим качеством прогнозов.

6. В качестве дополнительного критерия при выборе оптимального метода гидрологического прогнозирования предложен учет его экономической эффективности, которая определяется экономическим эффектом от его использования при решении водохозяйственных задач и затратами на разработку и использование основанных на этом методе схем получения прогноза для конкретных водных объектов.

7. В качестве наиболее экономичных рекомендуются методы, которые на основе специально разработанного комплекса программного обеспечения допускают их массовую реализацию в автоматизированном режиме. Даны примеры таких методов, разработанных в ФГБУ «Гидрометцентр России» и использующихся в рамках единой автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды для речных створов, расположенных практически по всей территории России.

8. При выборе оптимального метода гидрологического прогнозирования рекомендуется учитывать не только факторы, лимитирующие надежность и заблаговременность получаемых с его помощью прогнозов, не только результаты его практической реализации для различных водных объектов, но и требования потребителей прогностической продукции. При удовлетворяющей потребителей точности и заблаговременности прогнозов они склонны отдавать предпочтение более простым и дешевым методам их получения.

Список литературы

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. М.: Изд-во МГУ, 2011. 387 с.

2. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. М.: Изд-во МГУ, 2012. 142 с.

3. Блинов Д.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Колий В.М., Ривин Г.С., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Возможности использования

системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 2. С. 5-14.

4. *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.

5. Большая российская энциклопедия – электронная версия.

6. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.

7. *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.

8. *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.

9. *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.

10. *Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Изд-во Гидрометцентра России, 2018. 160 с.

11. *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.

12. *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.

13. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162-175.

14. *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.

15. *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.

16. *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.

17. *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.

18. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Изд-во ФГБУ «Гидрометцентр России», 2023. 200 с.

19. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Гидрологическая наука и практика XXI века // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 5-11.

20. 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.
21. 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.
22. Дробжева Я.В., Волобуева О.В. Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. СПб.: Адмирал, 2016. 116 с.
23. 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. С. 25-49.
24. Кондратьев В.И., Покровский О.М., Светлова Т.П. О принципах построения наземной сети // Труды ГГО. 1999. Вып. 547. С. 3-14.
25. 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.
26. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
27. Лобанова Н.М., Алтухова Н.Ф. Эффективность информационных технологий. М.: Юрайт, 2023. 237 с.
28. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 117 с.
29. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., Изд-во РАН, 2018. 300 с.
30. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
31. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Том 1 // ВМО-№ 485. Женева: ВМО, 2010. 37 с.
32. Покровский О.М. О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 5-21.
33. РД 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Методические указания. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
34. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
35. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
36. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогнозы ледовых явлений на реках и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 167 с.
37. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения // ВМО-№ 168. Женева: ВМО, 1994. 808 с.
38. 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.

39. Симонов Ю.А., Борщ С.В., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 37-46.
40. Христофоров А.В. Эколого-экономические основы водопользования. М.: Изд-во МГУ, 2010. 160 с.
41. Экстремальные гидрологические ситуации / под ред. Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцевой. М.: Медиа-ПРЕСС, 2010. 464 с.
42. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
43. 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.
44. Carpenter T.M., Georgakakos K.P., Sperflage J.A. Distributed hydrologic modeling for operational use // HRC Technical Report No. 3. 1999. 224 p.
45. Chow V.T., Maidment D. R., Mays L.W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988. 627 p.
46. Davie T. Fundamentals of hydrology. Second edition. London, New York: Taylor & Francis, 2008. 221 p.
47. Economic and environmental principles and guidelines for water and related land resources implementation studies. Washington, Water Resource Council, 1983. 129 p.
48. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide // Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 240 p.
49. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
50. Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information // WMO-№ 0168. 2009. 238 p.
51. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-№ 168, 2009. 302 pp.
52. Handbook of Hydrology / Eds. D.R. Maidment. New York: Mc Graw Hill, 1993. 978 p.
53. Kahneman D., Tversky A. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science. 1974. No. 4157. P. 1124-1131.
54. 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.
55. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-№ 1072. 2011. 138 p.
56. 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.
57. Nijkamp P. Cost – Benefit Analysis and Water resource Management. Amsterdam, 2005. 312 p.
58. Predictability of Weather and Climate / Eds.T. Palmer, R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006. 635 p.
59. Statistical methods in the Atmospheric Sciences // International Geophysics Series. – 2011. – Vol. 100. – 676 p.
60. World Meteorological Organization: Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting. Operational Hydrology Report No. 7 // WMO-No. 429. Geneva, 1987

References

1. *Alekseevskiy N.I., Frolova N.L., Khristoforov A.V.* Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniya. Moscow, MSU publ., 2011, 387 p. [in Russ.].
2. *Asarin A.E., Bestuzheva K.N., Khristoforov A.V., Chalov S.R.* Vodohozyaystvennye raschety. Moscow, MSU publ., 2012, 142 p. [in Russ.].
3. *Blinov D.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Koliy V.M., Rivin G.S., Semenova N.K., Simonov Yu. A., Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Possibilities of Using the COSMO-Ru System for Short-term Forecasting of Runoff of Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 89-96. DOI: 10.3103/S1068373923020012.
4. *Bobrovickaya N.N.* Sovremennoe sostoyanie gidrologicheskoy seti Rossii i osnovnye napravleniya ee razvitiya. Doklady VI Vserossiyskogo gidrologicheskogo s"ezda. Sekciya 1. Moscow, Meteoenstvo Rosgidrometa, 2006, pp. 5-8 [in Russ.].
5. Bol'shaya rossiyskaya enciklopediya – elektronnyaya versiya [in Russ.].
6. *Borsch S.V., Khristoforov A.V.* Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
7. *Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V.* Flood forecasting and early warning system for rivers of the Black sea shore of Caucasian region and the Kuban river basin. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].
8. *Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Short-range forecast of water levels in the Amur river. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 353, pp. 26-45 [in Russ.].
9. *Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A.* Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 68-86 [in Russ.].
10. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M.* Statisticheskii analiz v gidrologicheskikh prognozakh. Moscow, Izd-vo Gidromettsentra Rossii, 2018, 160 p. [in Russ.].
11. *Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Chupin I.V., Yumina N.M.* Extrapolation of hydrographs as a method of short-range runoff forecasting. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2018, vol. 369, pp. 74-86 [in Russ.].
12. *Borsch S.V., Leonteva E.A., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.* Evaluation of observation network configuration impact on long-range streamflow forecast accuracy. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2018, vol. 370, no. 4, pp. 122-136 [in Russ.].
13. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A.* Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175 [in Russ.].
14. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A.* Efficiency of streamflow modeling and forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 176-189 [in Russ.].
15. *Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.* Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].

16. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the hydrograph extrapolation method. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2021, vol. 381, no. 3, pp. 115-130 [in Russ.].

17. Borsch S.V., Vil'fand R.M., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of the influence of uncertainty in meteorological elements on the error of long-term river runoff forecasts. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2022, vol. 386, no. 4, pp. 36-46 [in Russ.].

18. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Gidrometcentr Rossii publ., 2023, 200 p. [in Russ.].

19. Borshch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M. Hydrological Science and Practice in the 21st Century. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2023, no. 12, pp. 5-11 [in Russ.].

20. Vil'fand R.M., Rivin G.S., Rozinkina, I.A. Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the example of COSMO-RU. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, pp. 1-9. DOI: 10.3103/S1068373910010012.

21. Danilov-Danil'yan V.I., Zalihanov M.Ch., Losev K.S. Ekologicheskaya bezopasnost'. Obshchie principy i rossiyskiy aspekt. Moscow, MPPA BIMPA publ., 2007, 288 p. [in Russ.].

22. Drobzheva YA.V., Volobueva O.V. Meteorologicheskie prognozy i ih ekonomicheskaya poleznost'. Saint Petersburg, Admiral publ., 2016, 116 p. [in Russ.].

23. Zmieva E.S., Komarov V.D., Sapozhnikov V.I. Metody prognozov vesennego pritoka vody v vodohranilishcha Volzhsko-Kamskogo kaskada. *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1967, vol. 8, pp. 25-49 [in Russ.].

24. Kondratyuk V.I., Pokrovskiy O.M., Svetlova T.P. O principah postroeniya nazemnoy seti. *Trudy GGO* [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory], 1999, vol. 547, pp. 3-14 [in Russ.].

25. Koren' V.I., Bel'chikov V.A. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu metodov kratkosrochnykh prognozov ezhednevnykh raskhodov (urovney) vody dlya rechnykh sistem na osnove matematicheskikh modeley. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 176 p. [in Russ.].

26. Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Yu.G. Formirovaniye rechnogo stoka. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1983, 216 p. [in Russ.].

27. Lobanova N.M., Altuhova N.F. Effektivnost' informacionnykh tekhnologiy. Moscow, Yurayt, 2023, 237 p. [in Russ.].

28. Metodicheskie rekomendacii po ocnke tochnosti i gidrologicheskomu kontrolyu dannykh gosudarstvennogo ucheta vod i ih ispol'zovaniya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, 117 p. [in Russ.].

29. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 300 p. [in Russ.].

30. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

31. WMO-No. 485. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Vol. I Global Aspects. Geneva, WMO, 2010, 37 p.

32. Pokrovskii O. M. A Rational Location of Regional Observation Network. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2000, no.8, pp. 5-21 [in Russ.].

33. RD 52.27.284-91. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. Metodicheskie ukazaniya. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1991, 150 p. [in Russ.].
34. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].
35. *Rukovodstvo* po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnnyy prognoz rashoda i urovnya vody na rekah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
36. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 3. Prognozy ledovykh yavleniy na rekah i vodohranilishchah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 167 p.
37. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications.* WMO, Geneva, 1994, 808 p.
38. *Simonov Y.A., Semenova N.K., Khristoforov A.V.* Short-range Streamflow Forecasting of the Kama River Based on the HBV Model Application. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 388-395. DOI: 10.3103/S1068373921060054.
39. *Simonov Y.A., Borsch S.V., Semenova N.K., Khristoforov A.V.* Short-range Streamflow Forecasting for Russian Rivers Using the HBV-96 Model and the COSMO-Ru System. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 12, pp. 1011-1018. DOI: 10.3103/S1068373923120014.
40. *Khristoforov A.V.* Ekologo-ekonomicheskie osnovy vodopol'zovaniya. Moscow, MSU publ., 2010, 160 p. [in Russ.].
41. Ekstremal'nye gidrologicheskie situacii. Pod red. N.I. Koronkevicha, E.A. Barabanova, I.S. Zaycevoy. Moscow, Media-PRESS publ., 2010, 464 p. [in Russ.].
42. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press publ., 2016, 480 p.
43. *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, 93 p.
44. *Carpenter T.M., Georgakakos K.P., Sperfslage J.A.* Distributed hydrologic modeling for operational use. HRC Technical Report No. 3, 1999, 224 p.
45. *Chow V.T., Maidment D. R., Mays L.W.* Applied Hydrology. New York: McGraw–Hill, 1988, 627 p.
46. *Davie T.* Fundamentals of hydrology. Second edition. London, New York: Taylor & Francis, 2008, 221 p.
47. Economic and environmental principles and guidelines for water and related land resources implementation studies. Washington, Water Resource Council, 1983, 129 p.
48. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide // Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 240 p.
49. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
50. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information.* WMO, Geneva, 2009, 238 p.
51. *WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.* WMO, Geneva, 2009, 302 p.
52. Handbook of Hydrology. Eds. D.R. Maidment. New York, Mc Graw Hill, 1993, 978 p.

53. *Kahneman D., Tversky A.* Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. Science, 1974, no. 4157, pp. 1124-1131.
54. *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.
55. *WMO-№ 1072.* Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO, Geneva, 2011, 138 p.
56. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.
57. *Nijkamp P.* Cost – Benefit Analysis and Water resource Management. Amsterdam, 2005, 312 p.
58. Predictability of Weather and Climate. Eds. T. Palmer, R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006, 635 p.
59. Statistical methods in the Atmospheric Sciences. *International Geophysics Series*, 2011, vol. 100, 676 p.
60. *WMO-No. 429.* World Meteorological Organization: Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting. Operational Hydrology Report No. 7. WMO, Geneva, 1987.

Поступила 01.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;

принята в печать 10.04.2024.

Submitted 01.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;

accepted for publication 10.04.2024.