

УДК 556.06

Современное состояние и перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России

В.А. Бельчиков, С.В. Бориц, Ю.А. Павроз, А.В. Романов, М.И. Сильницкая, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

В статье рассматриваются результаты работы отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России за последнее десятилетие. Эти работы были направлены на совершенствование и внедрение новых методов прогнозирования гидрологического режима рек и водохранилищ, совершенствование наблюдательной сети Росгидромета, разработку и внедрение автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов, на развитие методов верификации гидрологических прогнозов и их представления в вероятностной форме. Дается оценка современного состояния отечественной системы оперативного гидрологического прогнозирования, рассматриваются перспективы ее совершенствования на основе отечественного и мирового опыта с учетом современных технологий и необходимости повышения эффективности использования водных ресурсов и защиты от опасных гидрологических явлений.

Ключевые слова: система оперативного гидрологического прогнозирования, водный и ледовый режим рек и водохранилищ, автоматизированные системы выпуска прогнозов, верификация прогнозов, вероятностная форма выпуска прогнозов

Current status and prospects for improving the operational hydrological forecasting system in the Hydrometeorological Center of Russia

V.A. Belchikov, S.V. Borsch, Yu.A. Pavroz, A.V. Romanov, M.I. Silnitskaya, Yu.A. Simonov, A.V. Khristoforov

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

The paper describes the results of the work of the Division of River Hydrological Forecasts of the Hydrometeorological Center of Russia over the past decade. These works were aimed at improving and introducing new methods for forecasting the hydrological regime of rivers and reservoirs, designing the Roshydromet observational network, developing and implementing end-to-end early warning and flood forecasting systems, and developing methods for the verification of hydrological forecasts and their presentation in a probabilistic form. The current state of the operational hydrological forecasting system is assessed, and the prospects for its improvement on the basis of the Russian and world experience are considered taking into account modern technologies and a need to increase the efficiency of water use and protection from hydrological hazards.

Keywords: operational hydrological forecasting system, water and ice regimes of rivers and reservoirs, end-to-end early warning flood forecasting systems, forecast verification, probabilistic form of forecasts

Введение

В последние годы в Гидрометцентре России выполнялись исследования в рамках Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». Они были направлены на изучение современного состояния системы гидрологического мониторинга и прогнозирования и на выработку научно обоснованных рекомендаций по развитию и совершенствованию наблюдательной сети Росгидромета, созданию новых методов и технологий гидрологического прогнозирования.

Необходимым условием совершенствования системы гидрологического прогнозирования является модернизация наземной гидрометеорологической сети, что предполагает ее оптимизацию с учетом стоящих перед Росгидрометом задач и его возможностей. Проблема разработки вариантов оптимизации наблюдательной сети была решена на основе метода ретроспективных прогнозов, что позволило разработать рекомендации по оптимизации сети гидрологических постов и снегомерных маршрутов в бассейне Волги.

Одним из важнейших направлений деятельности гидрологов Гидрометцентра России на современном этапе является разработка систем автоматизированной подготовки и выпуска гидрологических прогнозов с целью повышения их надежности и своевременности принятия мер по защите от опасных гидрологических явлений и водохозяйственных решений на основе максимально полной гидрометеорологической информации. В статье на примере бассейнов Амура, Кубани, Волги и рек Черноморского побережья Кавказа рассматриваются подходы, использованные в Гидрометцентре России при создании таких систем.

Прогностическая деятельность Гидрометцентра России неразрывно связана с решением методических вопросов. В последние годы специалистами отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России был разработан проект Временных указаний по проведению оперативных испытаний новых и усовершенствованных методов речных гидрологических прогнозов. Предложенные в них методы верификации гидрологических прогнозов дают возможность максимально надежно оценивать надежность прогностических методов и делать обоснованный выбор наиболее эффективной схемы получения прогностических характеристик гидрологического режима рек, озер и водохранилищ. Для адекватного выражения возможностей предсказания гидрометеорологических процессов разрабатываются и внедряются в оперативную практику методы гидрологического прогнозирования в вероятностной форме.

Долгосрочные прогнозы речного стока

Долгосрочные прогнозы речного стока являются наиболее востребованным и ответственным звеном оперативной работы Гидрометцентра России, поскольку с учетом таких прогнозов принимаются наиболее важные оперативные решения, связанные с функционированием водохозяйственных систем и проведением противопаводочных мероприятий. Ежегодно повторяющееся половодье с продолжительным и высоким подъемом уровня воды является наиболее характерной фазой водного режима рек России, поэтому долгосрочные гидрологические прогнозы широко используются для обслуживания многих отраслей экономики страны, главным образом гидроэнергетики, сельского и водного хозяйства, лесосплава, рыбного и коммунального хозяйства, водного, железнодорожного и автомобильного транспорта.

Разработка методов прогнозирования расходов и уровней воды в реках и объемов притока воды в водохранилища, составление и доведение до потребителей всех видов долгосрочных гидрологических прогнозов и текущей информации является одним из важнейших направлений деятельности Гидрометцентра России.

Большинство используемых в настоящее время в оперативной практике методов долгосрочного прогнозирования весеннего стока основаны на физико-статистических зависимостях и разработаны в 60–80-е годы прошлого века с учетом существовавшего тогда уровня развития гидрологической науки, конфигурации и программы наблюдений гидрометеорологической сети Росгидромета. Климатические изменения и антропогенное воздействие на речные бассейны привели к изменениям в гидрологическом режиме рек [2]. К этому добавился экономический кризис 90-х годов, который привел к значительному сокращению количества гидрометеорологических станций и постов, что не могло не сказаться на точности и надежности оперативных прогнозов по прежним методикам. Таким образом, оперативно-прогностические учреждения Росгидромета столкнулись с необходимостью интенсификации процесса переработки методической базы долгосрочных прогнозов, в том числе и с необходимостью создания новых методов и моделей.

В соответствии с поставленной целью в Гидрометцентре России в последние годы был выполнен анализ всех существующих методов долгосрочного прогнозирования характеристик речного стока, их структуры, обеспеченности данными гидрометеорологических наблюдений, показателей их качества и надежности. Полученные результаты позволили сформулировать выводы, определяющие структуру подходов, связанную с разработкой методов и технологий долгосрочного прогнозирования характеристик водного режима рек в период половодья. Была получена типовая структура гидрологической модели, позволяющая разрабатывать детерминированные и вероятностные долгосрочные гидрологические

прогнозы характеристик водного режима конкретных рек и водохранилищ Российской Федерации [1, 6].

В процессе выполнения исследований по адаптации типовой структуры модели для долгосрочного прогнозирования характеристик паводкового режима рек различных природных и климатических зон нашей страны были разработаны рекомендации и предложения по совершенствованию системы оперативного долгосрочного гидрологического мониторинга и прогнозирования характеристик водного режима рек. Разработка методов долгосрочного прогноза выполнена для крупных районов, однородных по условиям формирования стока, – равнинной территории европейской части России, Западной и Восточной Сибири, горных регионов Северного Кавказа и Дальневосточного региона [3, 6, 11]. При этом основной упор был сделан на оперативную и технологическую завершенность, позволяющую сделать выводы о возможности их реализации в практической работе оперативных прогностических подразделений Росгидромета.

Впервые успешно реализована задача разработки метода долгосрочного прогноза стока на основе совместного использования концептуальной модели формирования речного стока и физико-статистических водно-балансовых зависимостей. Исследования проводились на основании материалов наблюдений, относящихся к территории бассейна Верхней Оки. Несмотря на то, что разработанный метод долгосрочного прогноза весеннего стока привязан к конкретному объекту, исследование носит в значительной степени методологический характер как первый опыт использования модели в долгосрочном прогнозе.

Использование математического моделирования в долгосрочном прогнозировании является новым подходом в гидрологических прогнозах и создает предпосылки разработки методов гидрологических прогнозов, основанных на более совершенных расчетных схемах. Положительным аспектом рассмотренной технологии является перспектива ее дальнейшего развития.

Обобщены и представлены рекомендации по разработке и применению методов и моделей для долгосрочных прогнозов паводкового стока горных рек России. Реализация этих рекомендаций проиллюстрирована на примере вероятностного прогноза гидрографа горной реки на период вегетации путем задания ряда вариантов (ансамблей) хода метеорологических элементов погоды в течение периода заблаговременности.

На основе современного отечественного и зарубежного опыта в области получения и анализа гидрологических и метеорологических данных наблюдений сформулированы принципы выбора существующих и разработки новых методов долгосрочного прогнозирования элементов водного режима в период половодья с учетом возможностей предсказания ожидаемого хода метеорологических элементов во времени и информации об их

пространственном распределении. Выполнен анализ специфики метеорологической информации, используемой при долгосрочном прогнозировании стока равнинных и горных рек [1, 11]. Проведенные исследования позволили представить рекомендации по различным способам корректировки долгосрочных гидрологических прогнозов с целью повышения уровня их достоверности, которые будут использованы в оперативной прогностической практике при совершенствовании и развитии системы долгосрочного прогнозирования весеннего стока рек.

В настоящее время Росгидрометом начаты работы по модернизации гидрологической сети. Совершенствование системы гидрологических наблюдений приведет к повышению эффективности и оперативности работы сетевых подразделений Росгидромета, улучшению качества материалов наблюдений. Это, в свою очередь, приведет к возможности создания новых, более современных, качественных и надежных прогностических методов, основанных на современных подходах к прогнозированию гидрологических явлений.

Необходимым условием совершенствования системы гидрологического прогнозирования является модернизация наземной гидрометеорологической сети, что предполагает ее оптимизацию с учетом стоящих перед Росгидрометом задач и его возможностей. В связи с этим выполнен теоретический анализ влияния количества и расположения пунктов наблюдений на точность прогноза речного стока, при котором наблюдаемая гидрометеорологическая характеристика используется в качестве предиктора. Это влияние определяется ролью этого предиктора, числом используемых для его определения пунктов наблюдений, показателем степени неравномерности их распределения по территории водосбора и показателем синхронности многолетних колебаний рассматриваемой гидрометеорологической характеристики в этих пунктах [9].

Предложена процедура статистического анализа многолетних данных наблюдений для определения параметров используемой стохастической модели поля рассматриваемой гидрометеорологической характеристики, проверки применимости этой модели и получения конкретной оценки влияния конфигурации наблюдательной сети на точность гидрологического прогноза. Теоретические положения подтверждены ретроспективными прогнозами весеннего половодья на реках бассейна Волги с использованием данных сети гидрометеорологических наблюдений, существовавшей до 1990 года и ее сокращенного в последующие годы варианта [7].

На основе полученных теоретических результатов выполнена оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги. Она основана на оценке возможности интерполяции данных каждого снегомерного маршрута по данным соседних при любом предполагаемом в перспективе их числе. Показано, что при сокращении с 1990 года числа снегомерных маршрутов с 75 до 45 выбор закрываемых маршрутов был научно обоснованным в 80 % случаев.

Краткосрочные прогнозы речного стока

В последние 15 лет в Российской Федерации наметилась тенденция к увеличению числа опасных гидрологических явлений, связанных с наводнениями, вызванными интенсивным снеготаянием или быстроразвивающимися дождевыми паводками. В ряде случаев подобные явления принимают характер крупных природных катастроф, что угрожает безопасности не только отдельных населенных пунктов, но и целых регионов страны. Это выдвинуло проблемы их предупреждения в число приоритетных задач, от решения которых зависит безопасность населения, экономики и страны в целом.

Для решения поставленных задач был исследован практически весь круг вопросов краткосрочного гидрологического прогнозирования – от разработок методов прогнозов и усовершенствованных методов их оценок до создания бассейновых систем автоматизированного прогноза паводкового стока на реках России. Была изучена современная структура системы гидрологического прогнозирования Росгидромета. Выполнен детальный анализ современных отечественных и зарубежных методов гидрологического прогнозирования, их возможностей и области применимости.

Детально изучена современная структура системы гидрологического прогнозирования Росгидромета с точки зрения обеспечения различной прогностической продукцией отраслей экономики, а также проанализирована сложившаяся практика взаимодействия специалистов прогностических центров с потребителями их продукции. На основе проведенного анализа требований потребителей к краткосрочным прогнозам паводкового стока и с учетом отечественного и зарубежного опыта разработаны рекомендации по использованию краткосрочных прогнозов паводкового стока в различных отраслях экономики.

Выполнен детальный анализ методов и технологий, применяемых в оперативной практике прогнозирования паводкового стока в бассейнах крупных рек. В результате проведенных исследований показано, что весьма актуальной является задача построения общей схемы краткосрочного прогноза расходов и уровней воды в бассейнах крупных рек, основанной на математических моделях, которые позволят переработать большой объем входной гидрометеорологической информации и построить единую технологию прогноза для всей речной системы. Для этой цели на примерах ряда речных систем, расположенных в различных природных зонах России, разработаны методы краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды, способные функционировать в автоматизированном режиме с использованием оперативной гидрометеорологической информации, имеющейся в оперативно-прогностических организациях Росгидромета.

Разработка методов краткосрочного прогноза паводкового стока выполнена для крупных речных бассейнов на равнинной территории

европейской части России, включая бассейн Волги, Северной Двины и Печоры, для бассейна Амура а также Кубани и рек Черноморского побережья Кавказа [1, 3, 4, 6].

Полученные результаты и разработанные методы краткосрочного прогнозирования характеристик паводкового стока будут использованы в ходе совершенствования и развития системы краткосрочного прогнозирования паводкового стока крупных речных бассейнов, а выработанные рекомендации позволят сократить время разработок новых методов и технологий, предназначенных для оперативного краткосрочного прогнозирования различных характеристик паводкового стока.

К числу наиболее важных проблем, от решения которых зависит успешная работа всей системы предупреждения о водном режиме рек, является методическое обеспечение оперативных подразделений Росгидромета современными методами гидрологического прогнозирования. Для решения этой задачи необходимо постоянное развитие и совершенствование методов краткосрочного и долгосрочного прогнозирования водного режима рек. В связи с этим представляется перспективным широкое внедрение в оперативную практику методов гидрологических прогнозов, основанных на использовании моделей формирования стока, которые дают описание процессов формирования речного стока на водосборе и его трансформацию в русловой сети [1, 3, 12].

Возможности использования моделей формирования стока в задачах прогнозирования опасных гидрологических явлений реализованы далеко не полностью. Во многом это связано с недостаточной информационной обеспеченностью гидрологического прогнозирования. По-прежнему велико несоответствие между режимными данными, используемыми для разработки методов прогноза, и оперативными, применяемыми при их выпуске. Особенно большие трудности возникают при разработке методов прогноза дождевых паводков для небольших водосборов из-за редкой сети метеорологических наблюдений и отсутствия оперативных данных об осадках по коротким интервалам времени. Это обстоятельство существенно сдерживает внедрение в оперативную практику новых методов прогнозов в паводкоопасных регионах, в частности в бассейнах рек Кубани, Терека, рек Черноморского побережья Краснодарского края, Уральского региона, Республики Бурятии, Иркутской и Читинской областей, Хабаровского и Приморского краев. В этих регионах требуется создание принципиально новой сети, состоящей из автоматизированных гидрологических постов и метеорологических станций, сети радарных наблюдений, что позволит получать информацию в режиме реального времени с любой дискретностью. В то же время следует продолжить развитие комплексной оценки снегозапасов, особенно в горах, на основе совместного использования различных источников информации (наземной, авиационной, спутниковой) и данных, получаемых в результате расчетов по моделям формирования снежного покрова.

Успешное прогнозирование гидрологических явлений невозможно без надежных метеорологических прогнозов. Необходимо разработать оптимальный вариант метеорологической модели, позволяющей наиболее успешно решать задачи, связанные с прогнозированием стока. Модель должна быть адаптирована к работе с существующей и модернизированной сетью гидрометеорологической сети Росгидромета, а также позволять усваивать новые виды информации, которые будут поступать с модернизированной сети, в том числе и радарные данные.

Для повышения эффективности методов гидрологических прогнозов необходимо создавать не просто гидрологические модели или методы прогнозирования, а необходимо разрабатывать технологии, основанные на совместном использовании гидрологических и метеорологических моделей. Выходная продукция этих технологий должна быть включена в систему предупреждений об опасных природных явлениях.

Ледовые прогнозы

Под ледовыми прогнозами понимают широкий круг задач, связанных с краткосрочным, средне и долгосрочным прогнозированием характеристик ледового режима рек, озер и водохранилищ. Прежде всего, это прогнозы сроков появления плавучего льда и установления ледостава, сроков вскрытия ото льда рек, начала ветрового дрейфа льда на водохранилищах и очищения их ото льда, сроков нарастания толщины и прочности льда до заданных значений, потери прочности льда в период его таяния, а также вероятности образования зажоров и заторов льда. При этом наиболее востребованными и известными широкому кругу потребителей являются прогнозы сроков образования и разрушения льда на водоемах суши нашей страны, на разработку методов и методик прогнозирования которых и были направлены усилия специалистов лаборатории ледовых прогнозов отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России в течение прошедших десяти лет.

Ледовые прогнозы как один из видов гидрологических прогнозов тесно связаны с потребностями практики. С началом становления ледовых прогнозов в 30–40-е гг. прошлого века практические задачи диктовали необходимость разработки, прежде всего, методов расчета и прогноза толщины льда для определения проходимости замерзших рек и ледовых переправ для военной техники. В 50–80-е гг. возникла необходимость ускоренного развития ледотермических расчетов и прогнозов в связи с масштабным гидротехническим строительством, развитием транспортной инфраструктуры, широким использованием рек как транспортных артерий. В связи с этим востребованными стали прогнозы сроков замерзания и вскрытия ото льда рек и водохранилищ, прогнозы вероятности образования зажоров и заторов льда, методы математического и физического моделирования процессов образования и разрушения снежно-ледяного покрова на водоемах суши, прогнозы долгосрочных прогнозов

сроков нарастания льда до заданной толщины и плотности, прогнозы скорости движения речного ледокольного флота в условиях ледовых явлений и т. д. Особое развитие в 80-е гг. получили исследования возможности долгосрочного прогнозирования сроков вскрытия и замерзания рек для обеспечения так называемой продленной речной навигации.

В последние 20–25 лет запросы потребителей в области ледовых прогнозов в связи с резким снижением объемов речных перевозок, уменьшением гидротехнического строительства и т. п. свелись к решению проблем, связанных с обеспечением гидрометеорологической безопасности страны. В этой связи в Гидрометцентре России продолжались исследования по созданию методов и методик прогнозирования сроков наступления осенних и весенних ледовых явлений, заторов и зажоров льда.

В настоящее время возможности Гидрометцентра России, да и всего Росгидромета в области разработки ледовых прогнозов весьма ограничены. Так, если в 70–80-е гг. прошлого века в Гидрометцентре СССР проблемой ледовых прогнозов занимались около 25 человек, среди которых были 4 доктора наук, крупнейших специалистов в области ледовых расчетов и прогнозов с мировым именем, и 7 кандидатов наук, то в настоящее время разработкой методов ледовых прогнозов занимаются лишь 3 человека, из которых только 2 – кандидаты наук. И это на всю Гидрометеорологическую службу нашей страны! Тем не менее за прошедшее десятилетие эта небольшая группа специалистов выполнила значительный объем не только научных исследований, но и технологических разработок.

Важнейшими достижениями минувшего десятилетия явились исследование возможности применения в практике оперативных краткосрочных прогнозов появления плавучего льда, установления ледостава на реках и водохранилищах хорошо известной специалистам модели Л.Г. Шуляковского с созданием на ее основе автоматизированной технологии прогнозирования и доведения результатов прогнозов до пользователей. При этом в качестве пользователей подразумевались прежде всего специалисты как Гидрометцентра России, так и территориальных прогностических центров Росгидромета, которые получают результаты работы модели (без участия человека) в оперативном режиме автоматически через электронную почту. Входной информацией в модель, помимо данных стандартных гидрометеорологических наблюдений, являются прогностические продукты метеорологических моделей, и в первую очередь модели COSMO-Ru. Данная автоматизированная система разработана и эксплуатируется для рек крайнего северо-востока Сибири, Лены, рек и водохранилищ бассейна Верхней Волги, Оки. В настоящее время заканчиваются разработки для Вятки, рек бассейна Камы до Камского водохранилища.

В области долгосрочных ледовых прогнозов основные усилия были направлены на разработку новых прогностических методик взамен устаревших, разработанных более 25–30 лет тому назад и требующих переработки или новой разработки. В основу разработки этих методик был

положен хорошо зарекомендовавший себя в оперативной практике синоптико-статистический метод, включающий нахождение методом дискриминантного анализа информативных районов в полях потенциальных предикторов (обычно это поля высоты геопотенциала на уровнях 500 и 100 гПа), сжатие информации в выделенных информационных районах методом компонентного анализа и формирование рядов предикторов – коэффициентов разложения полей по естественным ортогональным функциям и, наконец, получение самих прогностических уравнений методом пошагового корреляционного анализа. Таким образом, за прошедшие десять лет были разработаны и нашли применение в оперативной практике методики долгосрочного прогнозирования сроков наступления ледовых явлений на реках бассейнов Туры, Тобола, Колымы, Яны, Индигирки, Верхней Волги, Оки, Камы до Камского водохранилища и Вятки. В настоящее время планируется автоматизировать процесс подготовки, выпуска прогнозов, доведения результатов прогнозирования до пользователей на основе разработанных и разрабатываемых в Гидрометцентре России геоинформационных систем, таких как ГИС «АМУР», ГИС «Волга».

Верификация гидрологических прогнозов и их представление в вероятностной форме

В рамках методической деятельности специалистами отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России были разработан проект Временных указаний по проведению оперативных испытаний новых и усовершенствованных методов речных гидрологических прогнозов. Предложенные в них методы верификации гидрологических прогнозов дают возможность максимально надежно оценивать надежность прогностических методов и делать обоснованный выбор наиболее эффективной схемы получения прогностических характеристик гидрологического режима рек, озер и водохранилищ.

Верификация методики прогнозирования подразумевает статистический анализ соотношения между фактическими значениями гидрологической характеристики и их прогнозом по проверяемой методике. Без процедуры верификации разработка и внедрение методики прогнозирования не могут считаться завершенными. 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.

В последние годы разработан и внедрен в оперативную практику набор методов оценки погрешности гидрологических прогнозов. Каждый из них рекомендуется в зависимости от объема и структуры имеющихся данных наблюдений, на основе которых схема получения прогнозов была построена и может быть проверена. Первый метод рекомендуется при наличии достаточно продолжительного ряда гидрометеорологических наблюдений за период, последовавший после разработки и внедрения проверяемой методики прогнозирования. Второй метод рекомендуется на стадии разработки методики при наличии достаточно продолжительного ряда наблюдений. Используется процедура «скользящего контроля» с разбиением имеющегося ряда наблюдений на обучающий ряд для построения методики прогнозирования и контролирующей ряд для ее проверки. Рекомендуется многократное повторение этой процедуры с целью использования каждого года наблюдений в составе обучающего ряда. Третий метод рекомендуется при наличии ограниченного числа лет гидрометеорологических наблюдений. Используется процедура «выбрасываемой точки», при которой для проверки методики последовательно выделяется каждый год, а оставшиеся используются для ее построения. Четвертый метод при определенных условиях позволяет ограничиться проверкой методики на зависимом материале, образованном теми же данными многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений, которые использовались для ее построения. При этом соотношение между числом оцениваемых параметров схемы получения прогноза и объемом использованных данных наблюдений учитывается с помощью теоретической формулы. Для всех четырех методов получены формулы, позволяющие оценить их точность и, следовательно, получать правильное представление о достоверности результатов верификации методик гидрологического прогнозирования [5, 10].

В практике гидрологического прогнозирования нередко возникает ситуация, когда для одной и той же характеристики гидрологического режима водного объекта разработано несколько методик ее прогнозирования с одинаковой заблаговременностью. При этом возникает необходимость выбора наиболее точной из них. Если взамен применявшейся ранее методики предлагается ее усовершенствованный вариант, то требуется обоснование его преимущества. Во всех подобных ситуациях должна решаться задача выявления статистически достоверного различия между оценками погрешности методик гидрологического прогнозирования. Для ее решения разработан и внедрен в оперативную практику гидрологического прогнозирования набор критериев, устанавливающих статистическую достоверность вывода о преимуществе той или иной методики. Каждый из них рекомендуется в зависимости от специфики сравниваемых методик и статистических свойств рядов ошибок проверочных прогнозов,

полученных для каждой из них в одни и те же сроки. Эти критерии учитывают не только число проверочных прогнозов и оценки среднеквадратической погрешности прогноза по каждой из методик, но и коэффициент корреляции между сравниваемыми рядами ошибок проверочных прогнозов. Эта корреляция может быть весьма значительной благодаря использованию общих фактических значений прогнозируемой величины, наличию у сравниваемых методик одинаковых или сильно коррелированных между собой предикторов и неучтенных обеими методиками факторов прогнозируемого явления. С ростом этой корреляции достоверность преимущества одной из методик повышается при одном и том же соотношении между сравниваемыми погрешностями прогноза [5, 10].

Методики прогнозирования гидрологических характеристик реализуются на основе учета располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации о факторах их изменчивости. В качестве альтернативы может использоваться прогноз, основанный на статистическом анализе многолетних данных только о самой прогнозируемой характеристике. Для долгосрочных и некоторых среднесрочных гидрологических прогнозов в качестве такой безусловной альтернативы может рассматриваться климатический прогноз, в котором используется среднее многолетнее значение прогнозируемой характеристики. Для краткосрочных и некоторых среднесрочных гидрологических прогнозов в качестве такой безусловной альтернативы может рассматриваться инерционный прогноз, в котором учитывается известное значение прогнозируемой характеристики для даты их составления. Для краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды в качестве безусловной альтернативы предложен метод, основанный на экстраполяции гидрографов на период заблаговременности прогноза в виде линейной зависимости от наблюдавшихся расходов воды предшествующего периода. Данный метод обобщает инерционный прогноз, и, как показало его применение, для рек с плавными очертаниями их гидрографов он может оказаться точнее инерционного прогноза. На этом основании метод экстраполяции гидрографов планируется рекомендовать в качестве безусловной альтернативы при оценке эффективности методик краткосрочного прогнозирования речного стока и притока воды в водохранилища [8].

Практическое применение методики может считаться оправданным, если среднеквадратическая погрешность получаемых с ее помощью прогнозов ниже, а частота допустимых ошибок прогноза выше, чем у безусловной альтернативы. Статистическую достоверность преимущества проверяемой методики рекомендовано устанавливать с помощью указанных выше критериев сравнения методик гидрологического прогнозирования.

Полученные в последние годы результаты позволяют существенно усовершенствовать методы верификации гидрологических прогнозов и правила их оперативных испытаний по сравнению с действующими

с 1962 года Наставлениями по службе прогнозов. В настоящее время ставится задача внедрения разработанных методов и правил в мировую практику гидрологического прогнозирования, где в настоящее время ограничиваются показателем Нэша – Сатклиффа, который не учитывает заблаговременность прогноза и возможность использования безусловной альтернативы [5, 10].

Прогноз любой гидрологической характеристики всегда отличается от ее фактического значения. Потребителям прогноза необходимо представлять и учитывать вероятные отклонения ожидаемого значения гидрологической характеристики от ее прогноза. Стохастическая природа гидрологических процессов и возможности их прогнозирования делают необходимым дополнять выражение прогноза в обычной детерминированной форме с указанием ожидаемого значения прогнозируемой характеристики выражением прогноза в вероятностной форме с указанием свойств условного распределения вероятностей этого ожидаемого значения в зависимости от располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации, включая предсказание хода метеорологических элементов в течение периода его заблаговременности. В связи с этим разрабатываются методы прогнозирования в вероятностной форме, выполнена систематизация этих методов и определены условия их применимости, разработаны процедуры верификации и оценки эффективности гидрологических прогнозов в вероятностной форме, расширяется внедрение выпуска таких прогнозов в оперативную практику [5].

В качестве примера на рис. 1 помещены графики, которые для створа р. Сочи – г. Сочи позволяют определять вероятность $P_c(\tilde{Q})$ превышения соответствующих различным уровням опасности критических значений расходов воды $Q_c = 300, 500$ и $640 \text{ м}^3/\text{с}$. Эти вероятности определяются в зависимости от прогнозируемого с заблаговременностью одни сутки значения \tilde{Q} расхода воды. Графики приведены для ноября – месяца с максимальной паводковой активностью [5, 6].

В настоящее время в отделе речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России ведутся исследования факторов, которые лимитируют возможности прогнозирования гидрологических процессов. К таким факторам относятся ошибки наблюдений или расчетов фактических значений прогнозируемой гидрологической характеристики, ошибки предсказания хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза, значительное влияние ненаблюдаемых или непрогнозируемых процессов. Действие последнего фактора возможно при недостаточном развитии сети гидрометеорологических наблюдений или при отсутствии сколь-нибудь надежных методов предсказания хода метеорологических элементов в течение слишком большого (месяц и более) периода заблаговременности гидрологического прогноза. Каждый из указанных факторов приводит к появлению составляющей суммарной погрешности гидрологических прогнозов, которую

невозможно устранить за счет совершенствования методики их получения. Весьма перспективным представляется получение оценок таких составляющих еще на стадии, предшествующей разработке новой или усовершенствованию существующей методики прогнозирования. Если сумма этих составляющих близка к погрешности альтернативного прогноза, разработка новой методики бесперспективна. Если эта сумма близка к оценке погрешности уже существующей методики, ее дальнейшее усовершенствование нецелесообразно. Таким образом, достигается экономия времени и сил и появляется возможность более обоснованного выбора наиболее подходящего метода получения прогноза с учетом его заблаговременности, особенностей исследуемого региона, уровня его гидрометеорологической изученности и возможностей предсказания хода метеорологических элементов.

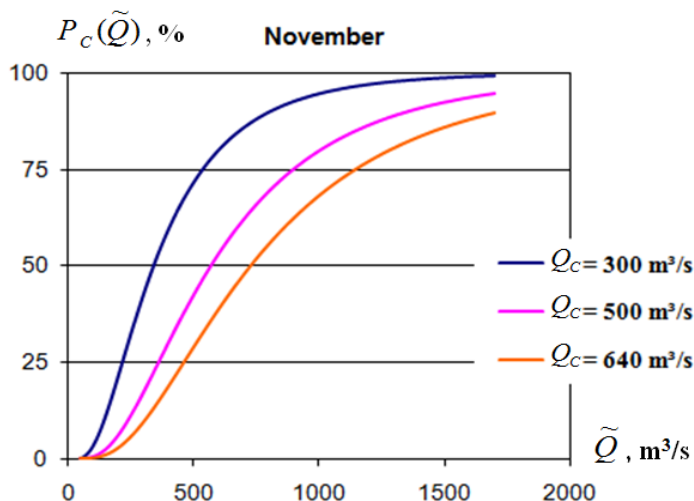


Рис. 1. Графики прогностической вероятности $P_c(\tilde{Q})$ в створе р. Сочи – г. Сочи для ноября.

Fig. 1. Graphs of forecasted probability of the Sochi river near the city of Sochi for November.

Автоматизированные системы выпуска гидрологических прогнозов

Важнейшей задачей на современном этапе развития гидрометеорологической науки и практики является создание эффективной и надежной системы гидрометеорологического мониторинга и прогнозирования на территории крупных речных бассейнов с целью обеспечения потребителей качественной, своевременной и доступной информацией о сложившихся и ожидаемых гидрологических условиях. В последние годы произошел качественный скачок в информационном, научном и техническом обеспечении гидрологических прогнозов – стали доступны данные

учащенных наблюдений, площадные оценки осадков, детальные метеорологические прогнозы; используются усовершенствованные методики прогнозирования, основанные на применении математических моделей формирования стока на водосборе; появились новые программные средства представления прогнозов с использованием ГИС-технологий. В связи с этим выпуск гидрологических прогнозов в оперативном режиме представляется крайне сложной в технологическом плане задачей, которую возможно сделать более эффективной и надежной с помощью внедрения автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов.

В Гидрометцентре России в последние годы ведется активная работа по разработке, внедрению и дальнейшей поддержке автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов для крупных речных бассейнов России. Разработка выполняется с учетом рекомендаций Всемирной метеорологической организации, а также опыта разработки подобных систем в ведущих зарубежных гидрометеорологических службах США, Франции, Великобритании, Швеции, Польши и других стран. Отличительной чертой автоматизированных систем гидрологического прогнозирования является структура с наличием подсистемы информационного обеспечения, подсистемы составления и выпуска прогнозов, а также доведения прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей.

Подсистема информационного обеспечения в автоматизированном режиме обеспечивает наличие обширной информационной основы для прогнозирования в режиме реального времени. Подсистема состоит из системы управления бассейновой базой гидрометеорологических данных, разработанной в Гидрометцентре России и функционирующей в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации АСООИ Гидрометцентра России [13]. Она включает программное обеспечение приема, декодирования, первичного контроля и хранения гидрометеорологической информации (всех видов наблюдений и метеорологических прогнозов), а также системы управления реляционными базами данных промышленного уровня.

Подсистема составления и выпуска гидрологических прогнозов основана на автоматизированной работе программного обеспечения, реализующего разнообразные методики гидрологических прогнозов: для краткосрочных и среднесрочных прогнозов – моделей формирования стока на водосборе, методики трансформации паводковых волн в руслах рек, статистические зависимости; для долгосрочных прогнозов – физико-статистические зависимости, а также динамико-стохастические модели. Подробное описание используемых методик приводится в предыдущих разделах настоящей статьи. Подсистема тесно взаимодействует с подсистемой информационного обеспечения на этапе подготовки и усвоения исходной гидрометеорологической информации, выполнения коррекции прогнозов в режиме реального времени, сохранения прогностических данных.

Для оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией реализована подсистема подготовки и доведения выходной продукции до пользователей. Подсистема реализована на основе веб- и ГИС-технологий, что позволяет визуализировать и интегрировать в единой информационной среде (сети Интернет) всю выходную продукцию. Взаимодействие с пользователями осуществляется с помощью веб-приложения, функционал которого разрабатывается с учетом требований пользователей системы. Вид веб-приложения с некоторым набором выходной продукции представлен на рис. 2.

За последние годы в Гидрометцентре России разработаны и внедрены автоматизированные системы гидрологического прогнозирования для бассейнов крупных речных систем: р. Кубань и Черноморского побережья России [3, 6].

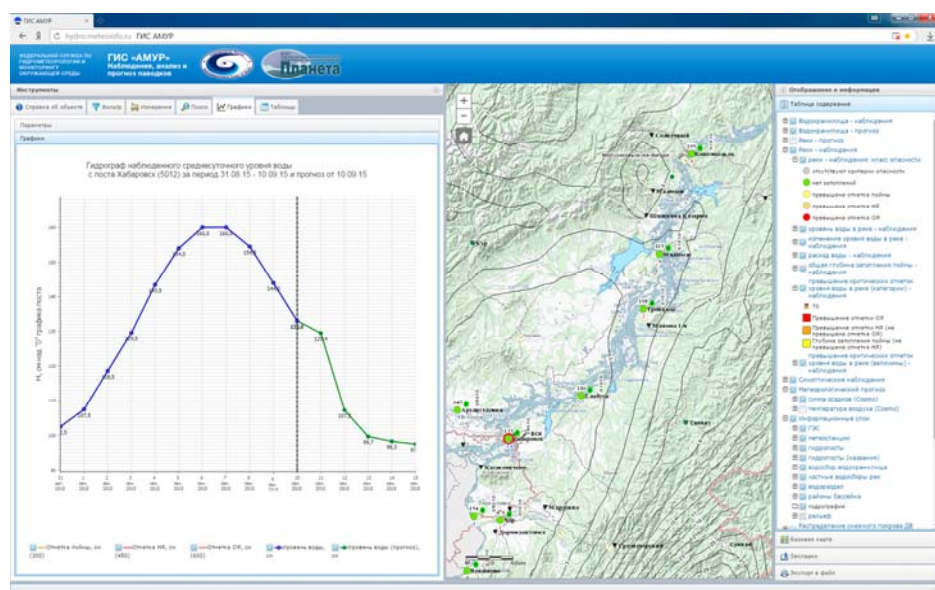


Рис. 2. Пример представления гидрологической продукции в веб-приложении ГИС «Амур» [14].

Fig. 2. An example of the presentation of hydrological products in the web application of the GIS "Amur" [14].

Совместно со специалистами ФГБУ «НИЦ «Планета» разработана система ГИС «Амур», которая по итогам международной конференции пользователей ESRI (Сан-Диего, Калифорния, США) была признана «Проектом 2015 года», а Гидрометцентр России и НИЦ «Планета» были удостоены высшей награды за особые достижения в области применения геоинформационных технологий – Special Achievement in GIS (SAG Award 2015). В настоящее время выполняются оперативные испытания

системы гидрологического прогнозирования в бассейне Волги (ГИС «Волга»), созданной в рамках проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета – 2».

Реализация автоматизированных систем прогнозирования позволяет существенно улучшить надежность и эффективность мониторинга и гидрологического прогнозирования Росгидромета. Автоматизация систем сбора и обработки исходной информации, выпуска гидрологических прогнозов, их доведения до пользователей в режиме реального времени в формате позволит снизить негативные последствия неблагоприятных и опасных гидрологических явлений и повысить эффективность использования водных ресурсов.

В связи с этим определенные перспективы связаны с международным сотрудничеством и, в частности, с партнерством с Европейской системой предупреждения о наводнениях (EFAS). В настоящее время EFAS является общеевропейской автоматизированной системой прогнозирования наводнений для территории практически всей Западной и ряда стран Восточной Европы с использованием системы гидрологических моделей LISFLOOD на базе ГИС-технологий. В качестве прогностической метеорологической информации в LISFLOOD используются детерминированные и ансамблевые прогнозы погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, метеослужбы Германии и Консорциума мелкомасштабного моделирования COSMO. Интерполяционная схема модели реализована для суточных и 6-часовых интервалов времени по гидрологическим и метеорологическим характеристикам. Она позволяет рассчитать водный баланс с 6-часовым интервалом для каждой ячейки сетки с размерами 5×5 км и даже на пространственной сетке $1,8 \times 1,8$ км с учетом основных процессов формирования стока и его трансформации в русловой сети. Все оперативные гидрологические прогнозы EFAS генерирует для гидрологических постов, для которых партнеры EFAS предоставляют соответствующие данные наблюдений в реальном масштабе времени, а также архивные гидрологические данные для калибровки модели LISFLOOD. Для больших территорий система EFAS позволяет получать среднесрочные прогнозы в вероятностной форме с заблаговременностью до 10 суток. В июне 2017 года после согласования всех административных вопросов с Росгидрометом был подписан договор о партнерстве Гидрометцентра России с EFAS и сформирована рабочая группа по развитию системы EFAS на территории Российской Федерации.

Заключение

Перспективы совершенствования системы оперативного гидрологического прогнозирования связаны с предстоящей работой отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России по следующим направлениям.

1. Разработка рекомендаций по модернизации системы гидрометеорологических наблюдений с восстановлением части закрытых, открытием новых гидрологических постов и метеорологических станций и снегомерных маршрутов, расширением сети автоматизированных гидрологических постов и радарных наблюдений в регионах с повышенной паводковой активностью.

2. Совершенствование и разработка методов гидрологического прогнозирования, которые используют математические модели и ГИС-технологии, учитывают особенности конкретного водного объекта и уровень гидрометеорологической изученности его водосбора, и позволяют с максимальной эффективностью использовать данные наземной сети Росгидромета, авиационную и спутниковую информацию.

3. Внедрение современных методов верификации гидрологических прогнозов в целях получения реальных оценок точности прогнозов и обоснованного выбора наиболее эффективных схем их получения.

4. Оценка и учет факторов, лимитирующих возможности прогнозирования гидрологических процессов в целях экономии затрат на усовершенствование существующих и разработку новых методик прогнозирования.

5. Повсеместное внедрение современных методов получения гидрологических прогнозов в вероятностной форме, которая дает правильное представление об ожидаемых значениях прогнозируемой гидрологической характеристики.

6. Разработка, внедрение и совершенствование автоматизированных систем выпуска гидрологических прогнозов с целью обеспечения потребителей надежной, своевременной и доступной информацией о сложившихся и ожидаемых гидрологических условиях на территории крупных речных бассейнов.

Список литературы

1. Бельчиков В.А., Борц С.В., Мухин В.М., Полунин А.Я. Опасные паводки в бассейне реки Кубань и методы их прогнозирования // 80 лет Гидрометцентра России». М.: Триада лтд, 2010. С. 401-422.
2. Бельчиков В.А., Полунин А.Я., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Оценка возможных климатических изменений стока рек бассейна Северной Двины в XXI веке // Метеорологи и гидрология. 2013. № 2. С. 84-92.
3. Борц С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 63-87.
4. Борц 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.
5. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.
6. Борц 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. Спец. вып. 356, 247 с.
7. Борц С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В. Оптимизация сети снегомерных маршрутов в бассейне Верхней Волги // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 62-73.
8. Борц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В., Юмина Н.М. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 74-86.

9. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Оценка влияния конфигурации наблюдательной сети на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 122-136.
10. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
11. Мухин В.М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 5-46.
12. Романов А.В. Обратные задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в реках. М.: Научный мир, 2008. 184 с.
13. Степанов Ю.А., Жабина И.И. Новая версия автоматизированной технологии АСОИ на выделенном сервере Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 146-169.
14. Borsch S.V., Khrstoforov A.V., A.; Krovotynzev V.A., Leontieva, E.F., Simonov Y.A., Zatyagalova V.V. A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin // Geosciences. 2018. Vol. 8, is. 3. P. 93.

References

1. Bel'chikov V.A., Borsch S.V., Muhin V.M., Polunin A.Ya. Opasnye povodki v basseine reki Kuban' i metody ih prognozirovaniya. 80 let Gidromettsentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 401-422 [in Russ.].
2. Bel'chikov V.A., Polunin A.Ya., Simonov Yu.A., Khrstoforov A.V. Estimation of possible climatic changes of river runoff in the Northern Dvina River basin in the 21st century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 119-125. DOI: 10.3103/S106837391302009X.
3. Borsch S.V., Simonov Y.A. Operational water discharge short-range forecasting system for the Kuban basin rivers. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 349, pp. 63-87 [in Russ.].
4. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khrstoforov 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.].
5. Borsch S.V., Khrstoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
6. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khrstoforov 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]*, Special issue, 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].
7. Borsch S.V., Leonteva E.A., Simonov Yu.A., Khrstoforov A.V., Chupin I.V. Snow route network optimization in the Upper Volga basin. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 369, no. 3, pp. 62-73 [in Russ.].
8. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khrstoforov A.V., Chupin I.V., Yumina N.M. Extrapolation of hydrographs as a method of short-range runoff forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 369, no. 3, pp. 74-86 [in Russ.].
9. Borsch S.V., Leonteva E.A., Simonov Yu.A., Khrstoforov A.V. Evaluation of observation network configuration impact on long-range streamflow forecast accuracy. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 370, no. 4, pp. 122-136 [in Russ.].
10. Borsch S.V., Khrstoforov A.V., Yumina N.M. Statisticheskii analiz v gidrologicheskikh prognozakh. Moscow, Gidrometcentr Rossii [*Hydrometcentr of Russia*], 2018, p. 160 [in Russ.].
11. Mukhin V.M. Methodological basis of physical-statistical kinds of short range forecasts of mountain river runoff. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 349, pp. 5-46 [in Russ.].
12. Romanov A.V. Obratnye zadachi matematicheskogo modelirovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody v rekah. Moscow, Nauchnyi mir, 2008, 184 p. [in Russ.].
13. Stepanov Yu.A., Shabina I.I. New version of automated technology ASOIP on dedicated server of Hydrometcenter of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 146-169 [in Russ.].
14. Borsch S.V., Khrstoforov A.V., A.; Krovotynzev V.A., Leontieva, E.F., Simonov Y.A., Zatyagalova V.V. A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin. *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 93.

Поступила в редакцию 05.09.2019 г.

Received by the editor 05.09.2019.