

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК: 556.06:556.166

Научная статья / Scientific paper

DOI: 10.34753/HS.2024.6.3.231

Краткосрочное прогнозирование стока реки Уссури: методика и специфика

З.А. Сучилина¹, Б.И. Гарцман¹, Л.В. Гончуков^{2,1}¹ Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия;² Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
г. Владивосток, Россия
e-mail: mezozyal@mail.ru

Аннотация. Краткосрочный прогноз речного стока остается одной из ключевых и важных в прикладном отношении задач гидрологии суши. Несмотря на длительную историю разработки методов краткосрочных гидрологических прогнозов и наличие развитого модельного инструментария, получение качественного прогноза остается сложной проблемой. Трудности её решения обусловлены недостаточными, по-прежнему, знаниями физических процессов стокообразования, их комплексным характером и индивидуальностью сочетаний для каждого бассейна, а также дефицитом достоверных и полных данных наблюдений. В статье рассмотрен пример разработки методики краткосрочного прогнозирования стока реки Уссури – пост Кировский (площадь водосбора 24400 км²). Бассейн располагается в Приморском крае, в пределах горной страны Сихотэ-Алинь. Регион относится к области Восточно-Азиатского внутритропического муссона, из-за чего наиболее характерным элементом гидрологического режима являются высокие дождевые паводки, вызывающие обширные разрушительные наводнения. Современные пространственно-распределенные модели стока уже стали общепринятым инструментом для решения самых разных задач гидрологии. Однако опыт их применения в России именно для задач краткосрочного прогноза стока пока очень ограничен, в особенности для рек с дождевым типом питания. Целью исследования является методическая разработка возможности создания эффективных методов краткосрочных прогнозов дождевых наводнений в бассейнах рек дальневосточного типа режима на основе современных средств моделирования – модели формирования стока на базе информационно-вычислительного комплекса ИМК ECOMAG с и мезомасштабной метеорологической модели WRF. Авторами в деталях рассмотрены различные этапы создания метода краткосрочного прогноза – разработка квазираспределенной физически-обоснованной гидрологической модели речного бассейна, её калибровка и верификация, разработка схемы и алгоритмов прогнозирования с привлечением прогнозных данных метеорологической модели WRF, проведение испытаний схемы прогнозов на независимых данных, выбор и обоснование техники введения оперативных поправок в результаты модельного прогнозирования стока, комплексное оценивание качества полученных прогнозов.

Ключевые слова: модель; калибровка; краткосрочный прогноз; расходы воды; наводнение; паводок.

Для цитирования: Сучилина З.А., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В. Краткосрочное прогнозирование стока реки Уссури: методика и специфика // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. Вып. 3. С. 231–249. DOI: 10.34753/HS.2024.6.3.231.

Short-term runoff forecasting of the Ussuri River: methodology and specifics

Zoya A. Suchilina¹, Boris I. Gartsman¹, Leonid V. Gonchukov^{2,1}¹ Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia;² Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
e-mail: mezozyal@mail.ru

Abstract. Nowadays, short-term river runoff forecasting remains one of the key and very important issues in terms of application in land hydrology. Obtaining a quality forecast remains a difficult problem despite the long history

of developing methods for short-term hydrological forecasts and the availability of advanced modeling tools. The difficulties of solving this problem lie in the lack of a complete understanding of the runoff formation process, as well as the shortage of reliable and complete observation data. The article examines an example of developing a methodology for short-term forecasting of the Ussuri River runoff – the Kirovsky gauging station (catchment area 24400 km²). The main part of the basin is located in Primorsky Region, within the Sikhote-Alin mountain system. The East-Asian extratropical monsoon regularly develops in this region, due to which the most characteristic element of the hydrological regime is high rain floods, causing extensive destructive floods. Modern spatially distributed runoff models have already become a generally accepted tool for solving a wide variety of hydrological problems. However, experience of their application in Russia, specifically for short-term runoff forecasting, is still very limited, especially for rivers with a rain-fed regime. The aim of the study is to develop a methodology for creating effective methods for short-term forecasts of rain floods in the basins of rivers of the Far-Eastern type of regime based on modern modeling tools – a runoff formation model based on the ECOMAG information and computing complex and the WRF mesoscale meteorological model. The authors examined in detail the various stages of creating a short-term forecast method. First, this is the development of a quasi-distributed physically-based hydrological model of a river basin, its calibration and verification. Second, the development of a forecasting scheme and algorithms using forecast data from the WRF meteorological model, testing the forecast scheme on independent data. Third, the selection and justification of the technique for introducing operational corrections to the results of model runoff forecasting, and a comprehensive assessment of the quality of the forecasts obtained.

Key words: model; calibration; short-term forecast; water discharge; inundation; flood.

For citation: Suchilina Z.A., Gartsman B. I., Gonchukov L.V. Short-term runoff forecasting of the Ussuri River: methodology and specifics. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2024, vol. 6, iss. 3, pp. 231–249. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.3.231.

Введение

Частые разрушительные наводнения является характерной чертой режима рек Дальнего Востока. Их особенность заключается в том, что они в основном проходят во вторую половину лета и в начале осени, и бывают вызваны дождями большой продолжительности и интенсивности, выпадающими на обширных площадях. С самого начала российского освоения Дальнего Востока, наводнения разрушали инфраструктуру, транспортные сети, поселения, а также губили урожаи, проходя именно в период его созревания и сбора. Несмотря на длительную историю борьбы с наводнениями, они остаются главным природным фактором, существенно ограничивающим развитие жизнедеятельности в регионе.

В частности, на реке Уссури наводнения остаются регулярными, порой катастрофическими событиями, последствия которых губительны не только для экономики, но также для жизни и здоровья людей. Опасность наводнений связана не только с интенсивностью дождевых паводков, но также и с уровнем освоения и экономического развития пойменных территорий, в связи с чем

оцениваемая частота наводнений существенно возросла во второй половине XX в. (таблица 1).

В середине XIX в. наиболее ранние упоминания о больших наводнениях на реке Уссури принадлежат русским исследователям Уссурийского края А.И. Венюкову, Н.М. Пржевальскому, А.Ф. Будищеву [Стоценко, 1958]. В XX в. встал вопрос создании службы краткосрочных гидрологических прогнозов и других методах борьбы с крупными паводками. Разработке методов краткосрочных и долгосрочных прогнозов паводков в регионе, частности на реке Уссури, посвящены исследования 1960–80-х гг. В. М. Лыло, И. Н. Гарцмана [Гарцман, Лыло, Черненко, 1971], Е. П. Тетерятниковой [Тетерятникова, 1988], А. М. Мордовина [Мордовин, 1988]. С 1990-х гг. и до настоящего времени количество исследований по данной проблематике сократилось. Но за последние 20 лет тематика краткосрочных прогнозов разрабатывалась в исследованиях Б.И. Гарцмана, Ю.Г. Мотовилова, А.Н. Бугайца и др. [Гарцман, 2008; Гарцман, Лупаков, 2017; Гарцман, Лупаков, 2019; Гарцман, Шамов, Губарева и др., 2023; Мотовилов, Бугаец, Гарцман. и др., 2017; Фалько, 2002].

Бассейн реки Амур, куда входит и река Уссури, располагается в области Восточно-Азиатского внетропического муссона, где формирование наводнений определяется взаимодействием морских тропических и арктических воздушных масс. Именно на их стыке складываются условия для возникновения обширных зон продолжительных интенсивных дождевых осадков, что и является причиной наводнений в летне-осенний период [Тетерятникова, 1988]. По классификации М. И. Львовича реки бассейна реки Амур относятся к рекам преимущественно дождевого питания. [Львович, 1937]. В объеме годового стока процент дождевого составляет 58–74 %. Обычно пик расходов воды приходится на период с мая по октябрь. При этом в мае присутствует доля снегового питания, затем паводки сменяются на исключительно дождевые. Пики расходов в летне-осенний период превышают максимумы весеннего половодья приблизительно в 2 раза, они отчетливо выделяются на гидрографе и сменяются фазой низкого стока вплоть до ноября [Мордовин, 1988].

В раннем анализе А.В. Стоценко [Стоценко, 1958] выделяет следующие периоды с наводнениями на реке Уссури:

- 1877–1901 гг. – количество наводнений 7, из них 2 катастрофических;
- 1902–1926 гг. – 15 наводнений, из которых 2 катастрофических;
- 1927–1951 гг. – 17 наводнений и 5 из них катастрофические.

В более современном исследовании Е.П. Тетерятникова разделяет четные десятилетия первой половины XX века (1920-е, 1940-е гг.) с пониженной водностью р. Амур, а нечетные наоборот с повышенной (1910-е, 1930-е, 1950-е гг.). Таким образом, 1920-е гг. закончились крупным наводнением на Амуре и в 1927 г. сформировалось сильное наводнение на реке Уссури. При этом крайне сильным наводнением были охвачены реки Приморского края в 1962, 1965, 1966, 1967 гг. И уже в 1970-е гг. установились засушливые условия и низкий сток, но в 1980-е гг. снова начались наводнения [Тетерятникова, 1988]. Обобщение статистических данных последних десятилетий выполнено пока лишь фрагментарно [Шаликовский, 2022], полный анализ проблемы представляет собой задачу дальнейших исследований, которые в свете разрушительных наводнений в Приморском крае в 2016, 2017 и 2021 гг. полностью сохраняют свою актуальность.

Таблица 1. Количество наводнений на реке Уссури за период с 1867–1994 гг. [Gubareva, Gartsman, 2005]

Table 1. Number of floods on the Ussuri River for the period from 1867 to 1994. [Gubareva, Gartsman, 2005]

Градация наводнения	Количество наводнений	Год
1. Обычное	77	1867–1993
2. Большое	12	1895, 1896, 1914, 1925, 1931, 1932, 1934, 1946, 1974, 1980, 1984, 1986
3. Катастрофическое	14	1897, 1927, 1938, 1943, 1950, 1962, 1966, 1967, 1968, 1971, 1979, 1989, 1990, 1994
ВСЕГО:	103	

Цель данного исследования заключается в разработке метода краткосрочного прогноза высоких расходов воды на реке Уссури с заблаговременностью от 1 до 3 суток для летне-осеннего паводкового сезона, на основе применения системы математических моделей. При этом рассматривается ряд специфических методических проблем, возникающих при использовании для прогнозирования пространственно-распределенной модели

речного стока – в данном случае использовался ИМК ЕСОМАГ. Учитывается соответствие заблаговременности и точности метода прогноза условиям информационного обеспечения и возможностям используемых средств моделирования. Выбор заблаговременности 1–3 суток в нашем случае ограничен, во-первых, спецификой мезомасштабной модели WRF, которая обеспечивает нашу схему прогноза метеорологической информацией, и, во-вторых,

размерами водосбора и средним временем добега 4 суток в пределах бассейна реки Усури. В таком случае период заблаговременности обеспечивает оптимальную точность прогноза [Гарцман, Лыло, Черненко, 1971]. Актуальной задачей исследования является использование средств математического моделирования гидрологического цикла для обеспечения информационной поддержки в чрезвычайных ситуациях.

Методы

Методика исследования строится вокруг обеспечения работы физико-математической модели гидрологического цикла суши ECOMAG. Данная модель хорошо описана в ряде публикаций и широко используется для решения различных задач, в том числе для прогнозов [Мотовилов, Гельфан, 2018].

Особенностью модели является схематизация бассейна в виде набора элементарных водосборов, степень детализации которых можно задавать вручную, что позволяет в различной степени учитывать физические процессы стокообразования в масштабах

бассейна. В пределах частных водосборов процессы формирования стока описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями с эффективными значениями параметров для каждого водосбора, что позволяет отнести модель к классу квазираспределенных. Применение оригинального алгоритма совместной калибровки параметров элементарных водосборов позволяет совместить преимущества распределенных и малопараметрических моделей. Исходная информация для настройки модели к исследуемому бассейну заключена в цифровых картах почв, ландшафтов, растительности и цифровой модели рельефа (ЦМР). После построения инфраструктуры и первичной параметризации модели для исследуемого бассейна выполняется ее калибровка с использованием метеорологической информации – многолетних рядов суточных значений осадков, температуры и дефицита влажности воздуха. Калибровка параметров пространственно-распределенной модели представляет собой особую задачу, решение которой существенно зависит от цели моделирования и заслуживает отдельного рассмотрения.

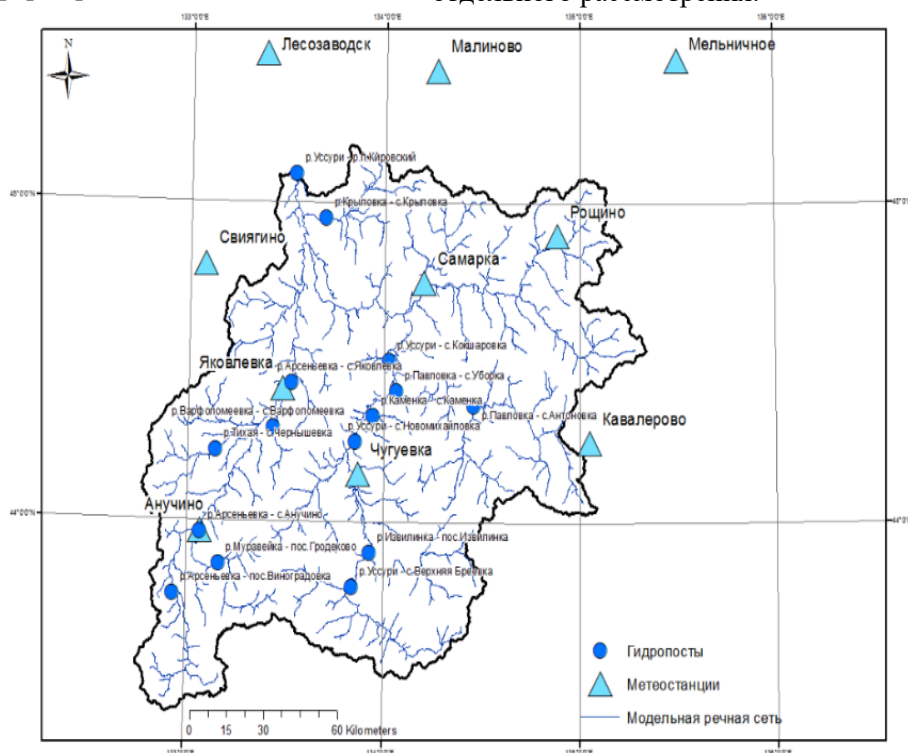


Рисунок 1. Карта-схема расположения метеостанций и гидропостов в бассейне р. Усури – п. Кировский
Figure 1. Map-scheme of the location of meteorological stations and gauging stations in the Ussuri River – Kirovsky post

Таблица 2. Метеостанции и гидропосты в бассейне р. Уссури**Table 2.** Meteorological stations and gauging stations in the Ussuri River basin

Индекс метеостанции/ гидропоста	Название метеостанции/ гидропоста	Высота для метеостанции, м / Площадь водосбора для гидропоста, км ²	Годы наблюдений
Метеостанции			
31878	Кировский	83	1978–2022
31931	Свиягино	100	1978–2019
31935	Яковлевка	124	1978–2022
31884	Малиново	129	1978–2022
31942	Самарка	171	1978–2020
31981	Анучино	183	1978–2022
31939	Чугуевка	264	1978–2020
Гидропосты			
5105	р. Уссури – п. Кировский	24400	1978–2022
5094	р. Уссури – с. Кокшаровка	9340	1978–2020
5092	р. Уссури – с. Новомихайловка	5170	1978–2020
5135	р. Павловка – с. Уборка	3350	1978–2020
5132	р. Павловка – с. Антоновка	2670	1978–2020
5151	р. Арсеньевка – с. Анучино	2480	1978–2020
5085	р. Уссури – с. Верхняя Бреевка	1720	1978–1994; 1998–2020
5122	р. Извилинка – п. Извилинка	1160	1978–1994; 1999–2020
5171	р. Крыловка – с. Крыловка	1070	1978–2020
5148	р. Арсеньевка – п. Виноградовка	940	1978–1996; 2001–2020
5160	р. Муравьевка – п. Гродеково	761	1978–2020
5166	р. Тихая – с. Чернышевка	632	2003–2020
5128	р. Каменка – с. Каменка	138	1978–2020

Типовая калибровка модели ECOMAG состоит из следующих этапов. Подготовка исходных данных для территории бассейна р. Уссури – п. Кировский включает, во-первых, набор метеорологической информации наземной сети (таблица 2), который представляет собой ряды данных о температурах воздуха (°C), осадках (мм) и дефицитах влажности воздуха (гПа) измеряемых на семи метеостанциях за период 1978–2022 гг. Выбранный период

обусловлен наличием наиболее полной метеорологической информации в исходной базе данных. Во-вторых, собраны данные 13 гидрологических постов в бассейне р. Уссури в виде многолетних рядов среднесуточных расходов воды (см. таблицу 2). Расположение метеостанций и гидропостов представлено на рисунке 1.

Для калибровки модели необходимо выбрать период продолжительностью от 10 лет и

более с наиболее полной и надежной гидрометеорологической информацией в архиве. В данном исследовании был выбран период с 1999 по 2009 гг., который в статье будем условно называть «базовым периодом калибровки», так как все эксперименты по калибровке модели проводились на этом периоде. Кроме того, данный период сравнительно близок к периоду, на котором выполнялись прогнозы.

Выполнялась калибровка модели в форме ручного подбора оптимальных параметров элементарных водосборов, включая параметры почвогрунтов, снеготаяния, испарения, инфильтрации и др., как это описано в

[Мотовилов, Гельфан, 2018]. Каждый параметр менялся в интервале своих допустимых значений, при каждом изменении повторялся расчет стока по модели. Результат оценивался по критерию Нэша-Сатклиффа [Nash, Sutcliffe, 1970; Гарцман, 2023], рассчитанному по рядам измеренных и смоделированных расходов замыкающего створа бассейна р. Уссури у п. Кировский. Таким образом, в результате калибровки параметров на базовом периоде удалось достигнуть значения коэффициента Нэша-Сатклиффа 0,84, что говорит о достаточно высоком качестве моделирования (рисунок 2).

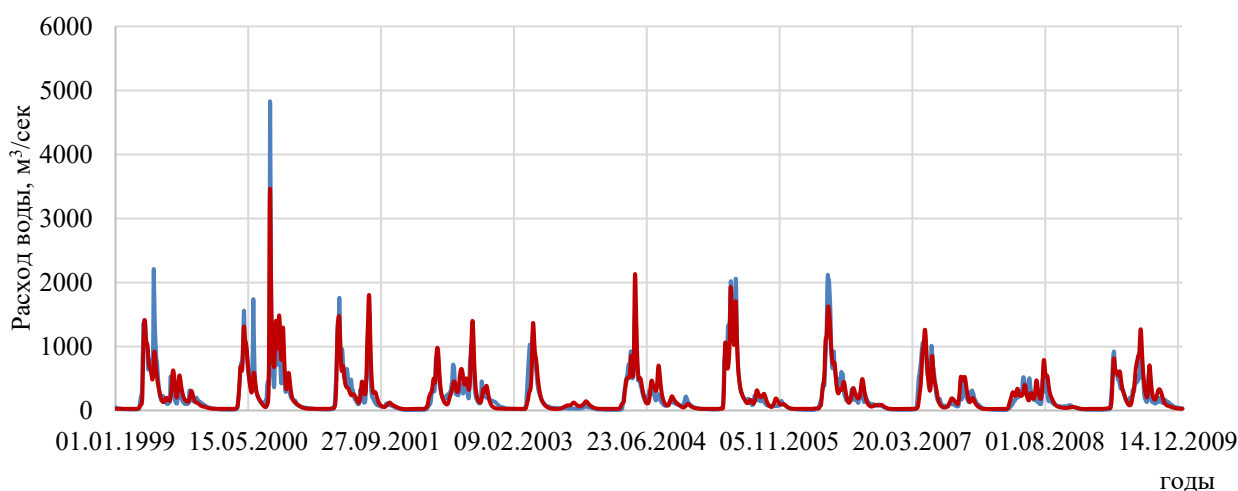


Рисунок 2. Фактический (синяя линия) и смоделированный (красная линия) гидрограф р. Уссури – п. Кировский за период 1999–2009 гг.

Figure 2. Actual (blue line) and simulated (red line) hydrograph of the Ussuri River – Kirovsky gauging stations for the period 1999–2009

Калибровка модели с учетом коэффициента шероховатости русла. Включение коэффициента шероховатости русла в качестве калибруемого параметра наряду с остальными параметрами из основного их набора при настройке модели ЕСОМАГ целесообразно как с теоретической, так и с практической точки зрения. Модель, в большинстве случаев её применения для рек в условиях умеренно-континентального климата с преобладанием снегового питания, настраивалась с постоянным «эффективным» значением шероховатости русел, поскольку этот параметр малочувствителен при относительно медленном и однородном в пространстве изменении водности. В условиях муссонного климата с неустойчивым дождевым питанием в течении летне-осеннего паводкового

сезона гидрограф стока отличается динамичностью, а пространственная структура стокоформирования – неоднородностью. При этом значение коэффициента шероховатости русла является крайне чувствительным параметром, изменяясь как в пространстве, так и во времени, в зависимости от степени наполнения русел. Калибровка коэффициента шероховатости русла, а также использование возможностей модели учитывать его пространственное разнообразие, позволяет более детально воспроизводить физику процессов при моделировании дождевых паводков, имитируя подъемы и спады расходов воды с большим приближением к реальной ситуации не только в замыкающем створе, но и на водосборе. Апробация данного подхода необходима для

составления качественного краткосрочного прогноза для исследуемого бассейна.

Калибровка модели с учетом коэффициента шероховатости русла выполнялась для разных периодов и сезонов 1999-2009 гг., с целью учесть разнообразие условий формирования стока и оценить динамичность параметров модели в зависимости от этих условий. Выполнялись независимые калибровки по данным:

- сухого периода – 2003, 2007–2009 гг., фактический расход воды не превышает 1000 м³/с;
- влажного периода – 1999–2002 гг., 2004–2006 гг., фактический расход воды превышает 1000 м³/с;
- весеннего периода – с 20 марта по 31 мая каждого года за период 1999–2009 гг.;
- летне-осеннего периода – с 1 июня по 30 сентября каждого года за период 1999–2009 гг.).

На каждом этапе калибровки в первую очередь оценивался и подбирался коэффициент шероховатости русла, затем настраивались остальные параметры. После этого проводилась оценка результатов по коэффициенту Нэша-Сатклиффа для замыкающего створа пост Кировский, а также по многомерному коэффициенту Нэша-Сатклиффа, вычисляемому как средневзвешенное по дисперсии значение коэффициентов для рядов расходов по всем постам в пределах бассейна [Gartsman, Solomatine, Gubareva, 2024].

Калибровка модели по данным всей группы гидропостов применялась для получения более надежных и адекватных значений параметров с использованием всей доступной для данного бассейна гидрологической информации. Методика такой калибровки описана в [Gartsman, Solomatine, Gubareva, 2024], где показано, что с её помощью можно разрабатывать единые модели, ориентированные на моделирование стока (а значит и его прогноз) не только в замыкающем створе бассейна, но и на частных водосборах. Основой методики является использование многомерной формы коэффициента Нэша-Сатклиффа. Проблемой при таком подходе является сильная скоррелированность данных различных постов в пределах одного бассейна, что нарушает корректность процедуры осреднения.

Для устранения скоррелированности между постами и получения адекватной оценки качества моделирования использовался метод главных компонент (PCA – Principal Component Analysis). Суть метода заключается в линейном преобразовании исходной системы координат, заданной матрицей скоррелированных исходных данных, в новую, которую принято называть *U*-пространством. *U*-пространство строится таким образом, что первая его ось ориентирована по направлению наибольшего рассеяния исходного облака данных, вторая ось вдоль максимального рассеяния перпендикулярно первой оси и т.д. В результате исходный набор переменных проецируется в новый набор переменных в *U*-пространстве, называемый главными компонентами. Число главных компонент равно исходному числу переменных, но они являются статистически независимыми (некоррелированными), т.е. ортогональными. В силу способа построения *U*-пространства, дисперсии главных компонент последовательно уменьшаются от первой до последней, в сумме достигая величины полной дисперсии исходной совокупности данных.

Если первые две главные компоненты содержат более 95 % дисперсии исходной данных, то их можно считать содержащими в основном значимую информацию и в дальнейшем ограничиться только их обработкой. Оставшиеся главные компоненты, содержащие менее 5 % дисперсии, отбрасываются (обнуляются) как шум, который включает в себя погрешности измерения расходов и другие ошибки. Далее выполняется обратное преобразование матрицы главных компонент из *U*-пространства в исходное, в результате чего получается матрица модельных расходов, очищенных от шума. Многомерный коэффициент Нэша-Сатклиффа рассчитывается с использованием очищенных от шума модельных данных и измеренных данных. Таким образом, методика позволяет использовать всю совокупность исходных данных с группы гидропостов, что должно приводить к более адекватной и надежной оценке параметров моделей, а также оптимизировать оценки качества моделирования для всех гидропостов одновременно, то есть обеспечивать групповое

моделирование (прогнозирование) стока [Gartsman, Solomatine, Gubareva, 2024].

В результате всех этапов калибровки были получены разные наборы оптимальных параметров для разных вариантов – для многоводных и маловодных лет, для весенних и летне-осенних сезонов, и др. В перспективе такой подход к калибровке направлен на переход к работе с гибридными моделями прогнозирования, способных оперативно выбирать набор параметров в зависимости от текущего состояния водного режима. В качестве рабочего варианта для использования в испытаниях краткосрочного прогноза расходов в период 2013–2022 гг. был выбран набор параметров, полученный при многомерной калибровке на базовом периоде 1999–2009 гг.

Методика расчета краткосрочного прогноза расходов воды. Важным этапом работы является сбор и подготовка метеорологической информации. В качестве источника выступают результаты расчёта мезомасштабной региональной модели атмосферы WRF-ARW [Skamarock et al., 2008], работающей в оперативном режиме в ФГБУ «Приморское УГМС» Росгидромета. WRF-ARW (Weather

Research and Forecast – Advanced Research WRF) – система численного моделирования атмосферы с открытым исходным кодом, предназначенная как для решения исследовательских задач, так и для оперативного прогнозирования. Разрабатываемая в NCAR (Национальный центр атмосферных исследований, США), система имеет большое количество инструментов, облегчающих настройку, запуск модели и обработку результатов расчета, что обусловило ее широкое распространение в среде исследователей и прогнозистов [Skamarock et al., 2019].

Расчет прогнозов производился на вычислительных ресурсах ФГБУ «Приморское УГМС» ежедневно с использованием начальных и граничных условий по данным глобальной модели атмосферы GFS с разрешением $0,25^\circ$ за срок 12 ВСВ. Расчётная область имела размер 150×150 ячеек с горизонтальным шагом 5 км и 28 вертикальных уровней, результаты сохранялись с дискретностью 1 час. Полученные массивы данных агрегировались в суточные значения путем суммирования (осадки) или осреднения (температура воздуха, дефицит упругости) за период 2013–2022 гг. (рисунок 3).

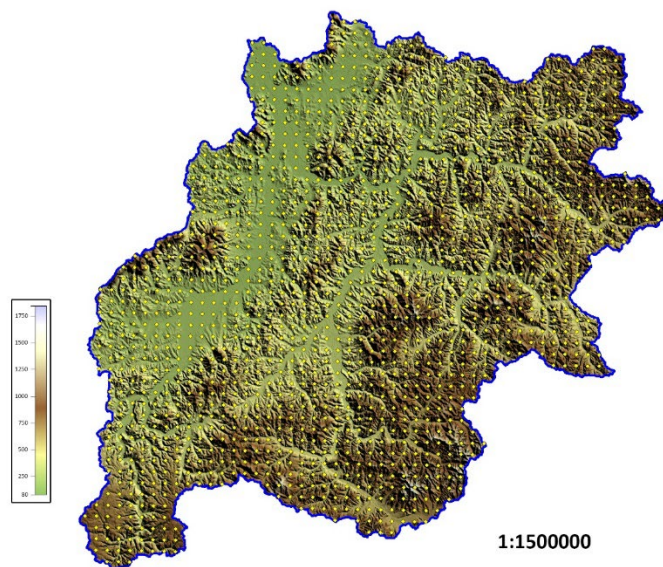


Рисунок 3. Сетка модели WRF на территорию водосбора р. Уссури – п. Кировский
Figure 3. WRF model grid for the Ussuri River – Kirovsky post

Общая схема алгоритма прогнозирования.

Таким образом, для бассейна реки Уссури до п. Кировский разработана и откалибрована на независимом периоде модель ECOMAG, которую

можно использовать в качестве основного расчетного инструмента для построения схемы краткосрочного прогноза расходов воды. Для этого же бассейна имеются достаточно полные и

качественные ряды наблюдений за расходами воды в 2013–2022 гг., которые можно использовать для верификации прогнозов. Кроме того, для этого периода имеются ежедневные прогнозные данные мезомасштабной модели атмосферы WRF на интервал заблаговременности 1–3 суток. На основе всего этого выполнены испытания метода краткосрочного прогноза речного стока с заблаговременностью также 1–3 суток. Временной интервал прогнозирования ограничим летне-осенним паводковым периодом, охватывающим июнь–октябрь каждого года.

Для испытаний метода прогноза отобраны данные за годы с наличием значительных паводков в летне-осенний период (с максимальным расходом выше 2000 м³/сек): 2013, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 и 2022 гг.. Прогнозирование выполнялось для периода с 31 мая по 31 октября. Расчетная схема прогноза направлена на полноценную имитацию реального оперативного прогнозирования и состоит из следующих этапов (рисунок 4):

1. Расчет контрольных точек. По фактическим метеорологическим данным на модели ECOMAG выполнялся расчет стока за период с 1 января каждого года по 30 мая (первая в году дата выдачи прогноза) – необходимый для достижения точности расчетов т.н. «разгон» модели. Далее, также по фактическим данным метеостанций на модели ежедневно, начиная от 31 мая, выполнялся расчет стока и сохранение контрольных точек расчета на каждые сутки до 31

октября. Контрольной точкой называется сохраненный на определенную дату набор всех параметров и значений переменных модели, что позволяет начать с этой даты дальнейший расчет без предварительного «разгона».

2. Подготовка ежедневных прогнозных данных модели WRF заблаговременностью 1–3 суток в форматах, необходимых для подачи на вход модели ECOMAG в качестве метеорологической информации.

3. Запуск прогнозной схемы расчета. Модель ECOMAG выполняет расчет ежедневно, от каждой контрольной точки, с использованием прогнозных данных WRF на 3 суток вперед. Таким образом, на каждый день всего летне-осеннего паводкового периода получаем прогноз стока на 3 дня вперед с использованием метеорологического прогноза.

4. Выгрузка полученных результатов и оценка качества прогнозов в сопоставлении с рядами измеренных расходов с помощью стандартных оценок качества. В качестве таких оценок используются рекомендуемые Росгидрометом меры [Наставление..., 1962; Гарцман, 2023] S/σ_{Δ} (отношение среднеквадратической ошибки прогноза к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины за период заблаговременности) и оправдываемость P (доля прогнозов с ошибкой меньше допустимого предела ошибки).

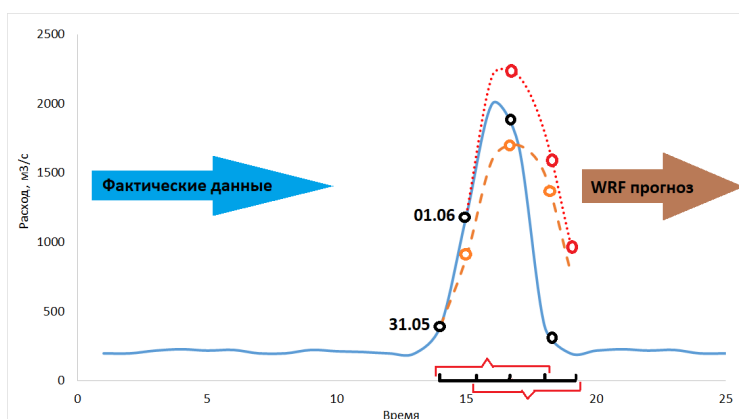


Рисунок 4. Расчетная схема краткосрочного прогноза на 3 суток (сплошная голубая линия – фактические расходы воды; красная и оранжевая штриховые линии – спрогнозированные значения расходов воды)

Figure 4. Calculation scheme of the short-term forecast for 3 days (solid blue line – actual water consumption; red and orange dashed lines – predicted water consumption values)

Необходимо отметить, что модель ЕСОМАГ при расчете для каждого элементарного водосбора использует метеорологическую информацию с ближайших к этому водосбору метеостанций. Число отбираемых метеостанций задается вручную и зависит от наличия станций и поставленной задачи. В случае, если для интерполяции используется небольшое число метеостанций, то в результате имеем более высокие смоделированные пики расходов за счет меньшего сглаживания метеорологических данных. Если для интерполяции используется большее число метеостанций, то осреднение метеорологической информации приводит к тому, что пики расходов несколько выполаживаются. В нашем исследовании просчитывались варианты интерполяции по 3, 4, и 5 ближайшим метеостанциям, чтобы подобрать их оптимальное число в соответствии с особенностями водного режима реки Уссури.

Введение поправок на прогноз расходов воды. Между фактическими расходами и их спрогнозированными значениями, основанными на использовании системы моделей, описанной выше, всегда есть расхождения. В задаче краткосрочного оперативного прогноза стока, особенно паводкового, такие расхождения всегда особенно значительны, что связано со сложностью процессов стокоформирования, неадекватностью воспроизведения гидрологических моделей, а также и с нерепрезентативностью и неточностью метеорологической информации – фактической и прогнозной. В целях улучшения качества краткосрочного гидрологического прогноза принято вводить оперативные поправки, которые связаны с усвоением поступающей гидрометеорологической информацией и коррекцией модельных расчетов [Мотовилов, Балыбердин, Гарцман и др., 2017; Борщ, Симонов, Христофоров, 2023].

В данном исследовании использованы три известных метода корректировки прогнозов. Первый из них основывается на подсчете разницы между фактическими и прогнозными значениями, именуемой «дельта» [Мотовилов, Балыбердин,

Гарцман и др., 2017]. Уравнение коррекции прогноза выглядит следующим образом:

$$Q_{for,i+\tau} = Q_{mod,i+\tau} + \alpha_d \Delta_i, \quad (1)$$

где $Q_{for,i+\tau}$ – спрогнозированный расход на момент $i + \tau$; $Q_{mod,i+\tau}$ – смоделированный расход на момент $i + \tau$; i – момент выдачи прогноза; τ – период заблаговременности прогноза; Δ (дельта) – ошибка расчета (разница между модельным и наблюдаемым расходами в момент времени i); α – весовой коэффициент коррекции прогноза.

Второй вариант коррекции [Гарцман, Губарева, 2007; Гарцман, Губарева, Бугаец, Макагонова и др., 2009] основан на уравнении регрессии исправленного прогноза на период заблаговременности также с использованием известной ошибки прогноза на момент его выпуска

$$Q_{for,i+\tau} = aQ_{mod,i+\tau} + bQ_{mod,i} + cQ_{for,i} + d, \quad (2)$$

где $Q_{for,i}$ – спрогнозированный расход на момент i ; $Q_{mod,i}$ – смоделированный расход на момент i ; a , b , c и d – коэффициенты множественной линейной регрессии, которая построена по архивному ряду за период 1980–2009 гг. между фактическим рядом и модельным рядом для каждой заблаговременности прогноза (сдвиги). Как видно из записи уравнений (1) и (2), они включают одни и те же предикторы для предсказания ошибки прогноза на период заблаговременности на основе текущей ошибки на момент выдачи прогноза и различаются лишь характером регрессии. Уравнение (1) с одним регрессионным коэффициентом дает более устойчивую во времени оперативную поправку прогноза, в то время как четыре регрессионных коэффициента уравнения (2) делают его значительно более «гибким».

Третий вариант коррекции заключается, фактически, в независимом прогнозировании ошибки прогноза с использованием уравнения авторегрессии ошибок прогноза на глубину 2 расчетных шага. Расчетная формула выглядит следующим образом

$$\Delta_{for,i+\tau} = k\Delta_{for,i} + l\Delta_{for,i-\tau} + m, \quad (3)$$

где $\Delta_{for,i+\tau}$, $\Delta_{for,i}$, $\Delta_{for,i-\tau}$ – ошибки прогнозов на моменты $i + \tau$, i и $i - \tau$, соответственно; k , l и m – коэффициенты множественной линейной

регрессии, которая построена по архивному ряду за период 1980–2009 гг. между фактическим рядом и модельным рядом для каждой заблаговременности прогноза (сдвигки). Поправка вводится в соответствии с рекомендациями работы [Борщ, Симонов, Христофоров, 2023].

Анализ результатов

Результаты калибровки модели ECOMAG. В ходе работы были подобраны разные наборы параметров, как это описано выше, что дает возможность использовать ту или иную комбинацию параметров в зависимости от гидрологических особенностей конкретного года. Результаты, представленные в таблице 3, позволяют оценить вариабельность отдельных параметров.

Часть параметров не изменяются для разных вариантов калибровки, либо потому, что слабо влияют на вид гидрографа, либо потому, что они в принципе не применялись при моделировании. К таким параметрам относятся уклон в озерах (Zrlake), горизонтальная водопроницаемость – почвенный горизонт А (GFAOPT), водоудерживающая способность снега (ULOPT) и параметры, отвечающие за корректировку количества жидких и твердых осадков (Prliq, Prsno).

Остальные параметры существенно изменяются и в качестве меры их изменчивости можно использовать размах их значений в различных вариантах калибровки по отношению к среднему по всем вариантам. Условно считаем, что вычисленная таким образом изменчивость в 50 % и больше говорит о сильной изменчивости (чувствительности) параметра, а величина изменчивости меньше 50 % указывает на слабую изменчивость параметра.

К сильно изменяющимся параметрам относятся: вертикальная водопроницаемость – горизонт А (FAOPT), горизонтальная водопроницаемость – горизонт В (GFBOPT), поверхностное задержание (коэффициент Попова) (POOPT), критическая температура для определения фазы атмосферных осадков (жидкие/твердые) (TCRpre), показатель степени в формуле инфильтрации (PKexр) и критическая температура таяния снежного покрова (TCRst). Слабо изменяются параметры испарения влаги с поверхности почвы (EKOPT), глубина горизонта А,

мощность верхнего почвенного слоя (ZAOPT) и коэффициент стаивания (ALFOPT).

Как описано выше, в качестве отдельного калибруемого параметра рассматривался коэффициент шероховатости, который не включен в стандартный интерфейс калибровки ИВК ECOMAG и не калибровался в предшествующих случаях применения модели. Необходимость калибровки шероховатости связано, как упоминалось, особенностями гидрологического режима рек с дождевым питанием, так как значение коэффициента шероховатости имеет определяющее влияние на форму гидрографа дождевого паводка. При выполнении калибровок было установлено, что шероховатость относится к сильно изменяющимся параметрам и это изменение физически обосновано и логично.

Результаты испытаний схемы краткосрочного прогнозирования. В результате испытаний метода прогнозов по описанной выше схеме были получены оценки качества моделирования (таблица 4), которые включают в себя стандартные критерии качества S/σ_A и оправдываемость P для нескольких вариантов прогнозирования, различающихся количеством метеостанций, используемых при интерполяции метеоданных (3, 4 либо 5), а также используемым методом коррекции прогноза.

Как видно из таблицы 4, во всех случаях прогноз без коррекции существенно хуже откорректированного прогноза. Это наблюдается для всех вариантов интерполяции и для всех оценок. Кроме того, мы наблюдаем, что оценка S/σ_A улучшается с ростом заблаговременности. Это характерно и для прогноза без коррекции, и в случае вариантов с применением коррекции, но для последних изменение оценок для заблаговременностей от 1 до 3 суток менее ярко выражено. Обусловлено это тем, что погрешность модельного прогноза S , как правило, мало меняется с ростом заблаговременности, при этом σ_A , которая отражает динамику процесса формирования стока, быстро нарастает с заблаговременностью. Наилучший вариант прогноза по оценке S/σ_A получается при интерполяции по 5 станциям с корректировкой AR2 (авторегрессия 2 порядка). Варианты с той же корректировкой при интерполяции по 4 и 3 станциям дают несколько

худшие результаты, а применение других видов коррекции – значительно худшие. При этом наилучшая оценка по S/σ_{Δ} для прогноза при

интерполяции по 5 станциям с корректировкой AR2 относит их качество к нижней границе интервала «удовлетворительно».

Таблица 3. Результаты подбора параметров

Table 3. Results of parameter selection

Параметр		Периоды калибровки							
Наименование	Аббревиатура	Базовый период (1999–2009 гг.)	Сухой период (Кировский)	Сухой период (NS по группе постов)	Влажный период (NS Кировский =NS группы постов)	Весна (NS Кировский =NS группы постов)	Лето (Кировский)	Лето (NS по группе постов)	Весь период (1999-2009) с использованием метода РСА
		параметры калибровки: коэффициент Нэша-Сатклиффа / Шероховатость русла							
		0,82	0,835	0,792	0,87	0,854	0,761	0,712	0,815
		0,1	0,05	0,05	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1
вертикальная водопроницаемость - горизонт А	FAOPT	2	4,5	4,5	2	2,2	2,1	2,1	1,9
уклон в озерах	Zrlake	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
горизонтальная водопроницаемость - горизонт А	GFAOPT	80,09	80,09	80,09	80,09	80,09	80,09	80,09	80,09
горизонтальная водопроницаемость - горизонт В	GFBOPT	40	20	10	40	47	33	33	40
испарение в почвах	EKOPT	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
глубина горизонта А, высота верхнего почвенного слоя	ZAOPT	2	2,5	2,6	2,2	2	2,5	2,6	2,4
поверхностное задержание (коэффициент Попова)	POOPT	1	0,7	0,4	1	0,7	1,1	1,1	1
коэффициент стаивания	ALFOPT	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
критическая температура для определения фазы атмосферных осадков (жидкие/твердые)	TCRpre	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
водоудерживающая способность снега	ULOPT	0	0	0	0	0	0	0	0
показатель степени в формуле инфильтрации	PKexp	2,5	2,5	2,5	2,5	0,9	2,5	2,5	2,5
критическая температура таяния снежного покрова	TCRst	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
коэффициент для осадков в жидкой фазе	Prliq	1	1	1	1	1	1	1	1
коэффициент для осадков в твердой фазе	Prsno	1	1	1	1	1	1	1	1

Для оправдываемости прогноза P , напротив, наиболее высокие значения получены для варианта с интерполяцией по 4 станциям и также для коррекции AR2. Незначительно хуже значения оправдываемости при интерполяции по 3 станциям, а при интерполяции по 5 станциям они еще хуже. При этом для всех видов коррекции

и заблаговременностей оценки оправдываемости различаются не слишком сильно, и все имеют довольно высокие значения. Для наилучшего варианта оценки по P при интерполяции по 4 станциям и применении коррекции AR2 значения оправдываемости 92–94 % указывают скорее на хорошее качество прогнозов (таблица 4).

Таблица 4. Оценки по результатам расчета краткосрочного прогноза для р. Уссури – п. Кировский 2013–2022 гг.

Table 4. Estimates based on the results of calculating the short-term forecast for the Ussuri River – Kirovsky gauging stations in 2013–2022

Виды прогноза	Вид интерполяции	S1/БЛ1	S2/БЛ2	S3/БЛ3	Оправдываемость на 1 сутки	Оправдываемость на 2 суток	Оправдываемость на 3 суток
Чистый прогноз	5	2,30	1,30	0,97	0,56	0,75	0,82
Прогноз с коррекцией по дельте		0,96	0,91	0,79	0,88	0,87	0,87
Коррекция по регрессии		1,00	0,97	0,84	0,88	0,86	0,88
Коррекция по AR2		0,85	0,89	0,81	0,92	0,90	0,90
Чистый прогноз	4	2,27	1,27	0,93	0,55	0,74	0,83
Прогноз с коррекцией по дельте		0,98	0,94	0,80	0,88	0,89	0,88
Коррекция по регрессии		1,06	1,04	0,89	0,89	0,88	0,89
Коррекция по AR2		0,86	0,90	0,82	0,94	0,92	0,92
Чистый прогноз	3	2,42	1,35	0,97	0,55	0,72	0,82
Прогноз с коррекцией по дельте		1,03	1,00	0,85	0,88	0,88	0,88
Коррекция по регрессии		1,20	1,20	1,02	0,88	0,88	0,88
Коррекция по AR2		0,88	0,95	0,87	0,93	0,92	0,91

Таким образом, наблюдается противоречие в оценках качества прогнозов, получаемых с применением основных мер – S/σ_{Δ} и P . Причиной такого противоречия являются особенности распределения плотности вероятности ошибки прогноза. Очевидно, что они распределены очень

асимметрично, по закону, близкому к логнормальному или с большей асимметрией, поскольку так же распределены и сами значения среднесуточных расходов воды. Большие ошибки прогнозов (выбросы) связаны с пиковыми расходами немногочисленных высоких паводков,

в то время как основная масса средних и меженных расходов прогнозируется с небольшими ошибками, особенно при выполнении корректировки (рисунок 4). Немногочисленные выбросы, с одной стороны, оказывают сильное снижающее влияние на квадратичную оценку качества S/σ_{Δ} , а с другой – почти не снижают оправдываемость, именно в силу своей немногочисленности. Таким образом получается парадоксальная ситуация – конечная для потребителя оценка прогнозов (оправдываемость) показывает его хорошее качество, но получить высокий эффект потребитель все-таки не сможет, поскольку главную ценность для него представляет именно прогноз высоких паводков, причиняющих основной экономический ущерб и создающих

технические и гуманитарные риски. Такое противоречие типично для прогнозирования стока рек с преобладанием дождевых паводков в режиме, высокие значения расходов на пиках, при высокой динамичности гидрографа, всегда прогнозируются с максимальными ошибками, что связано не только с несовершенством гидрологических моделей, но и с особо выраженными недостатками информационного обеспечения прогнозов при сложных синоптических ситуациях. Таким образом, прогнозирование пиковых расходов паводков является слабым местом для методики прогнозирования, а решение этой проблемы – главной задачей развития исследований по проблематике.

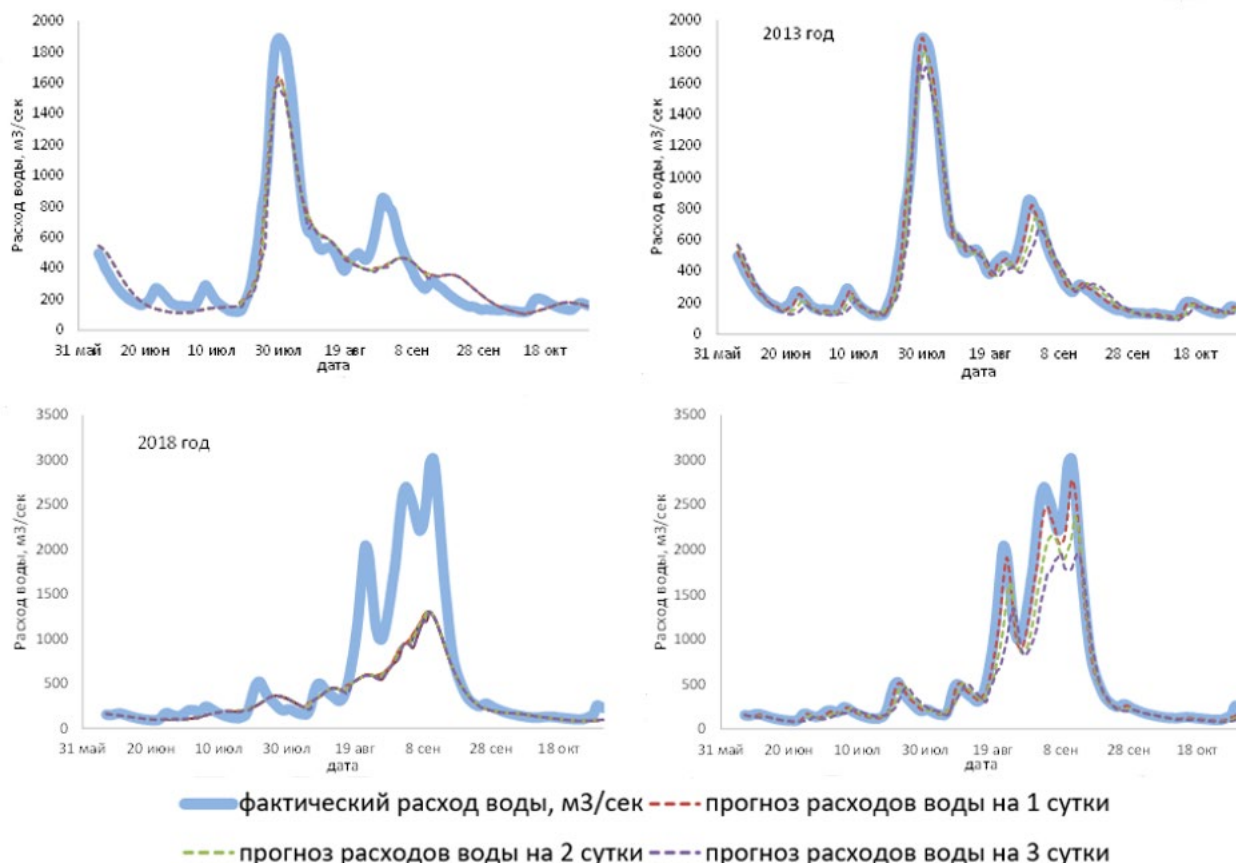


Рисунок 5. Прогнозные гидрографы расходов воды за 2013 и 2018 гг. р. Уссури – п. Кировский (слева – прогноз расходов воды без поправок «чистый прогноз»; справа – прогноз расходов воды с введением метода коррекции по авторегрессии второго порядка (AR2))

Figure 5. Forecast hydrographs of water discharge for years 2013 and 2018 for Ussuri River – Kirovsky gauging stations (on the left – forecast of water consumption without corrections "clean forecast"; on the right – forecast of water consumption with the introduction of the correction method according to the second-order autoregressive AR2))

Рассмотрим подробнее 2013 г., для которого получен прогноз хорошего качества. На рисунке 5 видно, что в 2013 г., особенно после введения поправки, модельные расходы хорошо описывают фактические расходы, не только по величине самого паводка, но и времени наступления – пики практически совпадают. Очевидны, конечно, и различия, где-то прогноз пика запаздывает, где-то завышает или занижает фактическое значение, но как отмечалось ранее, пики – это самое сложное место для любой модели гидрологического цикла суши.

Для 2018 г. ярко выражено занижение моделью пиков фактических расходов (рисунок 5), что не позволяет оценивать прогноз для данного года как с хорошим качеством. Такое отклонение относится к самой распространенной проблеме при моделировании речного стока. Единственным доступным в настоящее время путем улучшения выступает применение метода коррекции. В данном случае (рисунок 5) также была проведена коррекция по авторегрессии 2-го порядка, которая позволила получить смоделированные значения расходов существенно приближенные к фактическим, но, тем не менее, их не достигающие.

Заключение

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

- в условиях Дальнего Востока прогнозирование дождевых паводков является

Литература

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

Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.

Гарцман Б.И. Оценка качества моделирования и прогнозирования в гидрологии – рассуждение о методе // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 3. С. 228–243. DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.228.

важной гидрологической задачей, которая требует разработки надежной схемы прогноза, а также приоритетного внимания к совершенствованию её информационного обеспечения;

- разработка нового подхода к калибровке в рамках ИМК ECOMAG, включающего шероховатость, учитывает особенности водного режима реки Усури и дает новые возможности для перехода к более совершенным методикам моделирования;

- подготовлена и испытана схема краткосрочного прогноза дождевых паводков с заблаговременностью до 3 суток на основе ИМК ECOMAG по данным прогнозной метеорологической информации WRF;

- испытание схемы прогноза на основе ИМК ECOMAG в связке с мезомасштабной моделью климата WRF дает удовлетворительные результаты при включении постпроцессинга – применения методики оперативной корректировки прогнозов, основанной на использовании инерционных свойств погрешности прогнозирования.

Перспективой развития исследований по направлению является развитие гибких прогностических систем, имеющих возможность адаптировать параметры моделей к фазе водности, сезону и т.п., а также обеспечивающих прогнозы по группе пунктов прогнозирования в пределах одного бассейна на основе единой модели.

References

Borshh S.V., Simonov Ju.A., Hristoforov A.V. *Prognozirovanie stoka rek Rossii [Forecasting the flow of rivers in Russia]*. Moscow, Gidrometcentr Publ., 2023. 200 p. (In Russian).

Falko V.V. *Modelirovanie gidrografa letne-osennego stoka s uchetom vodoohrannoj roli lesa dlja malyh vodosborov Primor'ja. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk. [Modeling of the summer-autumn runoff hydrograph taking into account the water protection role of forests for small catchments in Primorye. Dissertation for the degree of candidate of geographical sciences]*. Ussuriysk, 2002. 213 p. (In Russian).

- Гарцман Б.И., Губарева Т.С. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 70–80.
- Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Бугаец А.Н., Макагонова М.А. Краткосрочный прогноз притока воды в водохранилище Бурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 1. С. 11–20.
- Гарцман И.Н., Лыло В.М., Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока // Тр. ДВНИГМИ. Вып. 34. 1971. С.165.
- Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ЕСОМАГ с использованием метеорологических прогнозов / Мотовилов Ю.Г., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В. // Водное хозяйство России. №1. 2017. С. 78 – 102.
- Кучмент Л.С. Гидрологическое прогнозирование для управления водноресурсными системами. Итоги науки: Гидрология суши. М., 1981. 193 с.
- Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Тр. ГГИ. 1937. №6. С. 28–38.
- Моделирование формирования стока в бассейне р. Уссури на базе модели Есомаг / Мотовилов Ю.Г., Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Лупаков С.Ю., Морейдо В.М., Сучилина З.А., Фингерт Е.А. // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сборник научных трудов: посвящается Году экологии России и 50-летию Института водных проблем РАН. Институт водных проблем Российской академии наук, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. 2017. С. 247–252.
- Мордовин А.М. Водные ресурсы Амурско-Комсомольского территориально-производственного комплекса (А-К ТПК) и прогноз их изменения под влиянием хозяйственной деятельности // Формирование вод суши юга Дальнего Востока: сб. научных трудов/ Под ред. А.М. Мордовина. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9–21.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных
- Gartsman B. I., Solomatine D. P., Gubareva T. S. A method of multi-site calibration of distributed hydrological models based on the Nash-Sutcliffe efficiency. *Geography, environment, sustainability*, 2024, 17(4), pp. 76–87. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3564.
- Gartsman B.I. *Dozhdevye navodnenija na rekah juga Dal'nego Vostoka: metody raschetov, prognozov, ocenok riska [Rain floods on rivers in the south of the Far East: methods of calculations, forecasts, risk assessments]*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2008. 223 p. (In Russian).
- Gartsman B.I. Ocenka kachestva modelirovanija i prognozirovanija v gidrologii – rassuzhdenie o metode [Assessing the quality of modeling and forecasting in hydrology – reasoning about the method]. *Gidrosfera. Opasnye processy i javlenija [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2023, Vol. 5, iss. 3, pp. 228–243. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.228.
- Gartsman B.I., Gubareva T.S. Prognoz gidrografa dozhdevykh pavodkov na rekah Dal'nego Vostoka [Forecast of hydrograph of rain floods on rivers of the Far East]. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and hydrology]*, 2007, no. 5, pp. 70–80. (In Russian).
- Gartsman B.I., Gubareva T.S., Bugaets A.N., Makagonova. M.A. Kratkosrochnyj prognoz pritoka vody v vodohranilishhe Burejskoj GJeS [Short-term forecast of water inflow into the reservoir of the Bureyskaya hydroelectric power station]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, 2009, no. 1, pp.11–20. (In Russian).
- Gartsman B.I., Lupakov S.Ju. Opyt scenarnogo prognoza rezhima maksimal'nogo stoka rek Ussuri i Bureja pod vlijaniem klimaticeskikh izmenenij [Experience of scenario forecasting of the maximum flow regime of the Ussuri and Bureya rivers under the influence of climate change]. *V sbornike: Vodnye resursy: novye vyzovy i puti reshenija. Sbornik nauchnyh trudov: [In the collection: Water resources: new challenges and solutions. Collection of scientific papers]*, 2017, pp. 501–506. (In Russian).
- Gartsman B.I., Lupakov S.Yu. Ocenka izmenenij rezhima pavodkovogo stoka reki Ussuri s uchetom sovremennykh klimaticeskikh proekcij do konca XXI veka [Assessment of the Ussuri river flood regime changes regarding to climate projections to the end of

- бассейнов. М.: Российская академия наук, 2018. 296 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001.
- Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч.1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 194 с.
- Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. Опыт сценарного прогноза режима максимального стока рек Усури и Буря под влиянием климатических изменений // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН. Институт водных проблем Российской академии наук, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. 2017. С. 501–506.
- Оценка изменений режима паводкового стока реки Усури с учетом современных климатических проекций до конца XXI века / Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 52–70. DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.006.
- Стоценко А.В. Проблема реки Амура и его крупнейших притоков (Зеи, Буреи, Сунгари, Усури). Владивосток: Приморское книжное издательство, 1958. 63 с.
- Тетерятникова Е.П. Некоторые особенности дождевого (муссонного) стока реки Амур // Формирование вод суши юга Дальнего Востока: сб. научных трудов / Под ред. А.М.Мордовина. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 4–9.
- Условия формирования стока: комплексные исследования на экспериментальных водосборах в верховьях р. Усури / Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Пшеничникова Н.Ф., Гончуков Л.В. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 261–267.
- Фалько В.В. Моделирование гидрографа летне-осеннего стока с учетом водоохранной роли леса для малых водосборов Приморья. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Усурийск, 2002. 213 с.
- Шаликовский А.В. Серия наводнений в бассейне реки Амур: анализ формирования, механизмы the XXI century]. *Gidrosfera. Opasnye processy i javlenija [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 52–70. (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.006.
- Gartsman B.I., Shamov V.V., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Kozhevnikova N.K., Bugaets A.N., Boldeskul A.G., Lutsenko T.N., Pshenichnikova N.F., Gonchukov L.V. runoff formation settings: multifaceted research in testbed catchments in the headwaters of the Ussuri River. *Doklady Earth sciences*. 2023, vol. 511, iss. 2, pp. 732–737.
- Gartsman I.N., Lylo V.M., Chernenko V.G. Pavodochnyj stok rek Dal'nego Vostoka [Flood flow of rivers in the Far East] // *Tr. DVNIGMI*, 1971, iss. 34, 165 p. (In Russian).
- Gubareva T.S., Gartsman B.I. Flood discharges estimation in the Amur Basin: alternative approach and spatial relations. *Flood, from Defence to management*. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp.195–204.
- Kuchment L.S. *Gidrologicheskoe prognozirovanie dlja upravlenija vodnoresursnymi sistemami [Hydrological forecasting for water resources systems management]*. Moscow, Science in Review: Land Hydrology Publ., 1981. 193 p. (In Russian).
- Lvovich M.I. *Opyt klassifikacii rek SSSR [Experience of classification of rivers of the USSR]*. Works of GGI, 1937, no. 6, pp. 28–38. (In Russian).
- Mordovin A.M. Vodnye resursy Amursko-Komsomol'skogo territorial'no-proizvodstvennogo kompleksa (A-K TPK) i prognoz ih izmenenija pod vlijaniem hozjajstvennoj dejatel'nosti [Water resources of the Amur-Komsomolsk territorial production complex (A-K TPC) and forecast of their changes under the influence of economic activity]. In Mordovin A.M. (ed.) *Formirovanie vod sushi juga Dal'nego Vostoka: sbornik nauchnyh trudov [Formation of the land waters of the southern Far East: collection of scientific papers]*. Vladivostok, DVO AN SSSR Publ., 1988, pp. 9–21. (In Russian).
- Motovilov Ju.G., Gel'fan A.N. *Modeli formirovanija stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov [Models of runoff formation in problems of river basin hydrology]*. Moscow, Publ. RAS, 2018. 367 p. (In Russian).

международного взаимодействия // Управление водными ресурсами. 2022. №2. С. 27–37. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_3.

Gartsman B. I., Solomatine D. P., Gubareva T. S. A method of multi-site calibration of distributed hydrological models based on the Nash-Sutcliffe efficiency. *Geography, environment, sustainability*, 2024, 17(4), pp. 76–87. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3564.

Gubareva T.S., Gartsman B.I. Flood discharges estimation in the Amur Basin: alternative approach and spatial relations. *Flood, from Defence to management*. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp.195–204.

Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhi, J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Report, 2008 (June), 113. DOI:10.5065/D6DZ069T.

Motovilov Yu. G. Bugayets A.N. Gartsman B.I. Gonchtsuov L.V. Kalugin A.S. Lupakov S.Yu. Moreido V.M. Suchilina Z.A. Fingert E.A. Modelirovanie formirovaniya stoka v bassejne r.Ussuri na baze modeli Ecomag [Modeling of runoff formation in the Ussuri River basin based on the Ecomag model]. *V sbornike: Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya. Sbornik nauchnyh trudov: [In the collection: Water resources: new challenges and solutions. Collection of scientific papers]*. 2017, pp. 247–252. (In Russian).

Motovilov Yu.G., Balyberdin V.V., Gartsman B.I., Gel'fan A.N., Morejdo V.M., Sokolov O.V. Kratkosrochnyj prognoz pritoka vody v Burejskoe vodохранилище na osnove modeli ECOMAG s ispol'zovaniem meteorologicheskikh prognozov [Short-term forecast of water inflow into the Bureya reservoir based on the ECOMAG model using meteorological forecasts]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii [Water management in Russia]*, 2017, no 1, pp. 78–102. (In Russian).

Nash J. E. and Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 1970, vol. 10, pp. 282–290.

Nastavleniya po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CH.1. Prognozy rezhima vod sushi. [Instructions for the forecasting service. Section 3. Part 1. Forecasts of land water regime.]. L.: Gidrometeoizdat, 1962, 194 p. (In Russian).

Shalikovsky A.V. Serija navodnenij v bassejne reki Amur: analiz formirovaniya, mehanizmy mezhdunarodnogo vzaimodejstvija [A series of floods in the Amur River basin: analysis of formation, mechanisms of international interaction]. *Upravlenie vodnymi resursami [Water Resources Management]*, 2002, no. 2, pp. 27–37. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_3 (In Russian; abstract in English).

Skamarock W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Powers, J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Report, 2008 (June), 113. DOI:10.5065/D6DZ069T.

Stotsenko A.V. *Problema reki Amura i ego krupnejshih pritokov (Zei, Burei, Sungari, Ussuri) [The problem of the Amur River and its largest tributaries (Zeya, Bureya, Sungari, Ussuri)]*. Vladivostok, Primorsky Book Publishing House, 1958. 63 p. (In Russian).

Teteryatnikova E.P. *Nekotorye osobennosti dozhdevogo (mussonnogo) stoka reki Amur // Formirovanie vod sushi juga Dal'nego Vostoka [Some features of rain (monsoon) runoff of the Amur River // Formation of land waters in the south of the Far East].* In Mordovin A.M. (ed.), *Sbornik nauchnyh trudov [Collection of scientific papers].* Vladivostok, DVO AN SSSR Publ., 1988, pp. 4-9. (In Russian).

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025

Принята к публикации / Accepted 10.03.2025