

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-39-57>

УДК 551.509+556.06

**Анализ сверхдолгосрочных прогнозов  
метеорологических характеристик  
речных бассейнов России  
с помощью модели климата INM-CM5**

***А.С. Грицун<sup>2</sup>, Н.К. Семенова<sup>1,2</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1,2</sup>,  
В.М. Хан<sup>1,2</sup>, А.В. Христофоров<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН,  
г. Москва, Россия*

Выполнен анализ качества сверхдолгосрочных прогнозов с заблаговременностью от одного года до пяти лет месячного и годового слоя осадков, среднемесячной и среднегодовой температуры приземного слоя воздуха, получаемых с помощью модели климата ИВМ РАН INM-CM5. Используются ряды проверочных прогнозов за период с 1991 по 2023 год. Прогнозы проверялись для 12 речных бассейнов, расположенных практически по всей территории России.

Использован метод коррекции прогнозов, который устраняет систематические ошибки, уменьшает их изменчивость и позволяет снизить погрешность сверхдолгосрочных прогнозов осадков почти в два раза, а температуры воздуха почти в три раза. Прогнозы внутригодового распределения осадков оказались удовлетворительными для 8 речных бассейнов из 12. Прогнозы внутригодового распределения температуры воздуха оказались успешными для всех 12 речных бассейнов.

Показано, что модель климата INM-CM5 может быть использована для составления сверхдолгосрочных прогнозов месячного и годового слоя осадков, среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха.

*Ключевые слова:* модель климата, сверхдолгосрочный прогноз, слой осадков, средняя температура, внутригодовое распределение, проверочные прогнозы, коррекция

**Analysis of ultra-long-term forecasts  
of meteorological characteristics  
of Russian river basins  
using the INM-CM5 climate model outputs**

***A.S. Gritsun<sup>2</sup>, N.K. Semenova<sup>1,2</sup>, Yu.A. Simonov<sup>1,2</sup>,  
V.M. Khan<sup>1,2</sup>, A.V. Khristoforov<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia*

The analysis of the quality of ultra-long-term forecasts with 1-5 year lead time of the monthly and annual precipitation sums, the average monthly and average annual surface air temperature obtained using the INM-CM5 climate model's outputs is performed. Series of verification forecasts for the period from 1991 to 2023 were used. Forecasts were checked for 12 river basins located in different parts of Russia.

To eliminate systematic forecast errors used a method for correcting, which reduces the error of ultra-long-term precipitation forecasts by almost two times, and air temperatures by almost three times. Forecasts of intra-annual precipitation distribution were satisfactory for 8 out of 12 river basins. Forecasts of the intra-annual distribution of air temperature were good for all 12 river basins.

Demonstrated, that the INM-CM5 climate model outputs can be used for ultra-long-term forecasting of monthly and annual precipitation, average monthly and average annual air temperature.

*Keywords:* climate model, ultra-long-term forecast, precipitation, mean temperature, intraannual distribution, verification forecasts, correction

## Введение

Неопределенность метеорологических условий периода заблаговременности гидрологических прогнозов оказывает хорошо известное негативное влияние на их точность. Это влияние возрастает по мере увеличения их заблаговременности и в конечном итоге ограничивает возможности предсказания характеристик гидрологического режима рек, озер и водохранилищ на отдаленную перспективу [3, 5, 8, 12, 13].

В целях снижения отмеченного негативного воздействия все большее распространение получает совместное использование моделей формирования речного стока и других элементов гидрологического режима водных объектов и различных метеорологических моделей, позволяющих предсказывать ход метеорологических элементов на территории водосбора на несколько суток [4, 13, 14, 18]. Примером удачного сочетания гидрологической и метеорологической моделей является разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» методика совместного использования концептуальной водно-балансовой модели формирования речного стока НВV-96 и оперативной системы регионального краткосрочного численного прогноза погода COSMO-Ru. В рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов данная методика позволяет достаточно надежно предсказывать с заблаговременностью 1–3 суток расходы воды для 252 речных бассейнов, расположенных практически по всей территории России [5].

Повышение научной обоснованности планирования и эффективности проведения мероприятий по использованию и охране водных ресурсов и защите от опасных и неблагоприятных проявлений гидрологического режима водных объектов требует всемерного повышения заблаговременности прогнозов их характеристик [4, 13]. Этим потребностям отвечают методики получения долгосрочных гидрологических прогнозов, в которых учет вероятного хода метеорологических элементов в течение периода их

заблаговременности позволяет предсказывать характеристики гидрологического режима водных объектов на месяц или даже на сезон (период половодья, меженный период) [16, 17, 19, 22–24].

Достижимая заблаговременность гидрологических прогнозов ограничивается современными возможностями предсказания метеорологических элементов на период продолжительностью год и более [3, 15, 18, 24]. Однако по мере развития гидрометеорологии, совершенствования наземной и дистанционной сети наблюдений и возможностей обработки и анализа располагаемой информации эти возможности неуклонно возрастают, что дает надежду на разработку и успешное применение методов сверхдолгосрочного гидрологического прогнозирования. Определенные надежды возлагаются на совместное использование моделей формирования речного стока и других элементов гидрологического режима водных объектов и различных климатических моделей, позволяющих предсказывать вероятный ход метеорологических элементов на территории водосбора на несколько лет. Перспективным вариантом такой модели является климатическая модель INM-CM5.

Разработанная в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН модель климата INM-CM5 предназначена для прогноза будущих изменений климата и для оценки последствий этих изменений для экосистем суши и моря, газового состава атмосферы, электрической цепи Земли и т. п. Модель дает математическое описание динамики климатической системы с учетом взаимодействия атмосферы, океанов, поверхности суши и криосферы. В атмосферном блоке модель имеет пространственное разрешение  $2^\circ \times 1,5^\circ$  и 73 уровня по вертикали, с самым верхним уровнем в 0,2 гПа. В океаническом блоке пространственное разрешение составляет  $0,5^\circ \times 0,25^\circ$  и 40 уровней по вертикали. Модель включает интерактивный аэрозольный блок, в котором рассчитываются концентрации 10 аэрозолей. Модель может использоваться для получения сверхдолгосрочных прогнозов полей метеорологических элементов на несколько лет с ансамблем их вероятного хода в течение каждого прогнозируемого года. Описание модели и возможностей ее использования содержится в работах [6, 7, 20, 21].

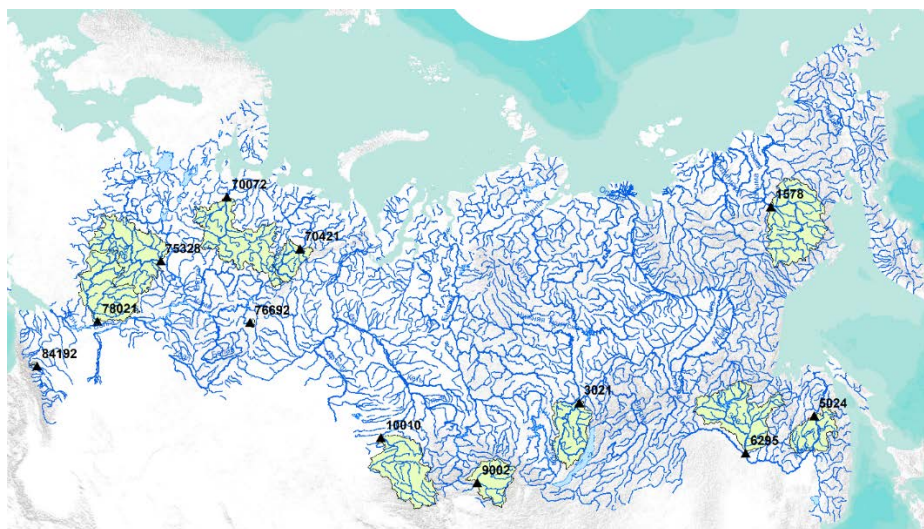
В ФГБУ «Гидрометцентр России» была предпринята попытка совместного использования модели климата INM-CM5 и концептуальной водно-балансовой модели формирования речного стока HBV-96 [9]. С учетом полученных при этом результатов в настоящей статье предлагается анализ сверхдолгосрочных прогнозов метеорологических характеристик формирования стока рек России с помощью модели климата INM-CM5. Анализируемые показатели качества прогнозов метеорологических характеристик совпадают с аналогичными показателями качества прогнозов их аномалий. С учетом данного обстоятельства и целей настоящего исследования рассматриваются не принятые в климатологии аномалии метеорологических характеристик, а их фактические и прогнозируемые значения.

### Исходные данные

Сверхдолгосрочные прогнозы метеорологических характеристик формирования речного стока с помощью модели климата INM-CM5 проверялись для 12 речных бассейнов, расположенных в различных климатических и физико-географических условиях России. Исследуемые реки имеют различные площади водосбора и различаются водным режимом и условиями формирования стока, характерными для большинства регионов нашей страны. Таким образом, выполненная для них оценка возможностей сверхдолгосрочного прогнозирования с помощью модели INM-CM5 позволяет судить о ее применимости для территории России в целом. Характеристики этих бассейнов, включая индексы гидрологических постов в замыкающих створах, площади водосбора  $A$  км<sup>2</sup>, средние многолетние значения годовой суммы осадков  $P$  мм и среднегодовой температуры приземного слоя воздуха  $T$  °С приведены в табл. 1. Расположение исследуемых речных бассейнов представлено на рис. 1.

**Таблица 1.** Характеристики рассматриваемых речных бассейнов  
**Таблица 1.** Characteristics of the considered river basins

Индекс	Река	Пункт	Регион	$A$ км <sup>2</sup>	$P$ мм	$T$ °С
70421	Печора	с. Усть-Шугор	Бассейн Печоры	67500	693	-0,9
70072	Северная Двина	п. Взвоз	Бассейн Сев. Двины	285000	741	2,0
75328	Ока	г. Горбатов	Бассейн Оки	244000	802	5,6
76692	Сылва	с. Шамары	Бассейн Камы	2140	746	2,1
78021	Дон	ст. Новогригорьевская	Бассейн Дона	208000	726	6,8
84192	Малка	с. Каменноостское	Бассейн Терека	1540	617	3,3
10010	Обь	г. Камень-на-Оби	Бассейн Оби	216000	687	1,8
9002	Енисей	г. Кызыл	Бассейн Енисея	115000	409	-2,8
3021	Лена	с. Змеиново	Бассейн Лены	140000	576	-3,1
5024	Амур	г. Комсомольск-на-Амуре	Бассейн Амура	1730000	914	0,4
6295	Зея	г. Белогорье	Бассейн Амура	229000	810	-2,5
1578	Ясачная	с. Нелемное	Бассейн Колымы	32000	460	-10,1



**Рис. 1.** Расположение рассматриваемых речных бассейнов.

**Fig. 1.** Location of the considered river basins.

Использование осредненных по территории каждого речного бассейна фактических значений суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха в качестве входной информации в концептуальную водно-балансовую модель формирования речного стока HBV-96 позволяет получать расчетные значения среднесуточных расходов воды в замыкающем створе, близкие к их фактическим величинам. Коэффициенты корреляции между расчетными и фактическими расходами варьируют от 0,84 до 0,95 и в среднем равны 0,89 [9]. Следовательно, приведенные в указанной работе неудовлетворительно высокие ошибки сверхдолгосрочных прогнозов речного стока рассматриваемых водосборов обусловлены прежде всего ошибками прогнозов метеорологических характеристик, получаемых с помощью модели климата INM-CM5.

В целях оценки и анализа этих ошибок для каждого из 12 речных бассейнов использован многолетний период с 1991 по 2023 год. Анализировались ретроспективные прогнозы (хиндкасты) модели INM-CM5 с заблаговременностью 1–5 лет, представленные в виде ансамбля из 10 вероятных вариантов (реализаций) сверхдолгосрочного прогноза полей годового хода осадков и приземной температуры воздуха суточного разрешения. На основе этих реализаций для каждого речного бассейна формировался архив прогностической метеорологической информации, который для каждой заблаговременности сверхдолгосрочного прогноза от 1 года до 5 лет содержал 10 сценариев хода суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха, осредненных по его территории. Фактические данные

о средней температуре воздуха и суточных суммах осадков, осредненных по территории каждого речного бассейна определялись по данным сети метеорологических станций Росгидромета.

Ошибки получаемых с помощью модели INM-CM5 прогнозов с заблаговременностью от 1 года до 5 лет определялись и анализировались для месячного и годового слоя осадков, для среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха. При этом с фактическими значениями этих характеристик за период с 1991 по 2023 год сравнивались результаты осреднения полученных с помощью модели INM-CM5 10 вероятных вариантов их хода для тех же лет.

### **Коррекция систематических ошибок прогнозов**

Несмотря на значительные достижения в области численного моделирования предсказуемость гидродинамических процессов на временных масштабах от субсезонного до более длительного имеет успешность, слегка превышающую уровень для климатических прогнозов. Ошибки моделирования, влияющие на качество прогнозов, обусловлены многими факторами, связанными с погрешностями исходных данных и несовершенством и неполным описанием физических процессов в моделях. Даже самые продвинутые современные модели подвержены этим ограничивающим факторам. Погрешности, отмеченные на начальной стадии моделирования, могут существенно исказить конечные результаты, увеличивая систематическую ошибку.

Практика показывает, что качество долгосрочных прогнозов, как правило, сильно зависит от сезона, географического региона, а также от особенностей сформировавшейся крупномасштабной атмосферной циркуляции. Например, в Северной Евразии существует сложная система физико-географических факторов, затрудняющих моделирование и, как следствие, снижающих успешность прогнозирования температурно-влажностных условий.

Для повышения качества долгосрочных прогнозов на этапе постпроцессинга на регулярной основе применяется процедура статистической коррекции. Этот метод включает нормировку моделей на основе ретроспективного анализа данных и применение методов статистической интерпретации (например, [10]). Такие подходы позволяют корректировать систематические ошибки и случайные возмущения, улучшая адаптивность прогнозов к конкретным локальным условиям.

Существует разнообразие статистических и динамических методов коррекции прогнозов, которые выбираются в зависимости от региона и временного диапазона. Эти методы классифицируются на линейные и нелинейные. Линейные методы, как правило, основаны на простых линейных зависимостях между модельными и эмпирическими данными [2].

Как и следовало ожидать, в «сырых» прогнозах систематические ошибки, определяемые как средние значения ряда ошибок прогноза

за период с 1991 до 2023 год, оказались значительными. При этом с ростом заблаговременности прогноза знак ошибок сохраняется, а их абсолютные значения не увеличиваются. Систематические ошибки прогнозов годового слоя осадков с заблаговременностью от 1 года до 5 лет варьируют от 58 до 29 %. Обращает на себя внимание некоторая географическая закономерность. Для западных равнинных регионов страны характерны положительные систематические ошибки, а для восточных – отрицательные. Систематические ошибки прогнозов среднегодовой температуры воздуха в основном положительны. То есть модель INM-CM5 в основном занижает осадки на западе и завышает на востоке России и занижает температуру воздуха.

Отмеченные систематические ошибки вносят существенный вклад в погрешность модельных прогнозов, однако они могут быть без особого труда устранены путем коррекции прогнозов.

Ошибка прогноза величины  $Y$  равна разности  $Y - \tilde{Y}$  между этой величиной и ее прогнозом  $\tilde{Y}$ . Если систематическая ошибка прогноза  $\bar{\delta}$ , то есть среднее значение разности  $Y - \tilde{Y}$  статистически достоверно отличается от нуля, то простейший вариант коррекции состоит в ее устранении путем увеличения прогнозов на эту величину. В данном случае коррекция состоит в переходе от значений  $\tilde{Y}$  к значениям  $\tilde{Y}_C = \tilde{Y} + \bar{\delta}$ .

В качестве более эффективного средства в работе [2] предложен метод линейной регрессии, в котором учитываются полученные по ряду проверочных прогнозов стандартные статистические оценки математического ожидания  $m(Y)$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma(Y)$  прогнозируемой величины  $Y$ , аналогичные оценки  $m(\tilde{Y})$  и  $\sigma(\tilde{Y})$  для ее прогноза  $\tilde{Y}$  и оценка коэффициента корреляции  $R$  между величинами  $Y$  и  $\tilde{Y}$ . Скорректированный прогноз определяется в виде:

$$\tilde{Y}_C = m(Y) + R \frac{\sigma(Y)}{\sigma(\tilde{Y})} [\tilde{Y} - m(\tilde{Y})]. \quad (1)$$

Определяемое формулой (1) значение  $\tilde{Y}_C$  имеет такое же среднее значение  $m(Y)$ , что и прогнозируемая величина. Следовательно, данный метод коррекции позволяет устранить возможную систематическую ошибку прогноза.

Среднеквадратическое отклонение  $\sigma(\tilde{Y}_C)$  скорректированного прогноза равно  $R\sigma(Y)$ , то есть оно всегда несколько меньше, чем у прогнозируемой величины. Следовательно, амплитуда вероятных колебаний скорректированного прогноза  $\tilde{Y}_C$  меньше, чем у прогнозируемой величины  $Y$ . Ее предсказуемость с помощью корректируемой методики характеризуется коэффициентом  $R$ . С ростом предсказуемости рассматриваемой

гидрологической характеристики этот коэффициент приближается к единице. При этом среднеквадратическое отклонение  $R\sigma(Y)$  скорректированного прогноза и амплитуда его вероятных колебаний будут приближаться к среднеквадратическому отклонению  $\sigma(Y)$  и амплитуде вероятных колебаний прогнозируемой величины [2, 5].

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

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

Предлагаемый вариант коррекции всегда снижает погрешность методики прогнозирования, и этот эффект усиливается по мере роста коэффициента корреляции  $R$  между прогнозируемой величиной  $Y$  и ее прогнозом  $\tilde{Y}$  [2, 5].

Эффективность изложенного метода коррекции прогнозов и, в частности, устранения их систематической ошибки характеризует отношение  $S/S_C$  среднеквадратических погрешностей прогнозов до и после коррекции.

В табл. 2 приведены значения  $S/S_C$  для прогнозов годового слоя осадков с заблаговременностью от 1 до 5 лет.

**Таблица 2.** Показатель  $S/S_C$  эффективности коррекции прогнозов годового слоя осадков

**Таблица 2.** Efficiency metrics  $S/S_C$  of corrected forecasts of the annual precipitation sums

Индекс	Река	1 год	2 года	3 года	4 года	5 лет
70421	Печора	1,4	1,6	1,5	1,5	1,5
70072	Северная Двина	1,2	1,2	1,1	1,2	1,3
75328	Ока	2,2	2,3	2,2	2,2	2,3
76692	Сылва	1,3	1,4	1,3	1,2	1,3
78021	Дон	2,4	2,5	2,3	2,4	2,6
84192	Малка	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4
10010	Обь	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2
9002	Енисей	4,0	4,1	4,2	4,9	4,0
3021	Лена	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3
5024	Амур	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8
6295	Зeya	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3
1578	Ясачная	3,7	2,7	2,4	2,6	2,7

Приведенные данные показывают, что, как и рассмотренные выше систематические ошибки прогнозов годового слоя осадков, соответствующий им показатель  $S/S_C$  не зависит от заблаговременности прогнозов. Он варьирует от 1,1 до 4,9 и в среднем равен 1,9. Аналогичные результаты были получены для месячных осадков. Таким образом, предлагаемая коррекция сверхдолгосрочных прогнозов осадков в среднем позволяет снизить их погрешность почти в два раза.

В табл. 3 приведены значения  $S/S_C$  для прогнозов среднегодовой температуры воздуха с заблаговременностью от 1 до 5 лет.

**Таблица 3.** Показатель  $S/S_C$  эффективности коррекции прогнозов среднегодовой температуры воздуха

**Table 3.**  $S/S_C$  efficiency indicator of corrected forecasts of average annual air temperature

Индекс	Река	1 год	2 года	3 года	4 года	5 лет
70421	Печора	2,6	2,3	2,5	2,5	2,3
70072	Северная Двина	5,6	4,8	4,9	5,1	4,7
75328	Ока	3,3	3,4	3,0	3,0	3,0
76692	Сылва	3,9	3,7	3,8	3,7	3,6
78021	Дон	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3
84192	Малка	10,0	10,4	9,4	10,4	10,9
10010	Обь	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2
9002	Енисей	1,9	1,9	1,9	1,9	2,1
3021	Лена	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2
5024	Амур	1,3	1,3	1,5	1,4	1,4
6295	Зeya	2,2	2,1	2,2	2,3	2,3
1578	Ясачная	1,6	1,8	1,7	1,6	1,6

Приведенные данные показывают, что показатель  $S/S_C$  не зависит от заблаговременности прогнозов. Он варьирует от 1,2 до 10,9 и в среднем равен 3,0. Аналогичные результаты были получены для среднемесячных температур воздуха. Таким образом, предлагаемая коррекция сверхдолгосрочных прогнозов температуры воздуха в среднем позволяет снизить их погрешность почти в три раза.

После коррекции прогнозов основным показателем их качества становится коэффициент корреляции  $R$  между фактическими значениями метеорологических характеристик и их прогнозами. Анализ этих коэффициентов приводится в следующем разделе.

### Коэффициенты корреляции между рассматриваемыми метеорологическими характеристиками и их сверхдолгосрочными прогнозами

В табл. 4 приведены коэффициенты корреляции  $R$  для прогнозов месячного и годового слоя осадков с заблаговременностью 1 год.

**Таблица 4.** Значения коэффициента корреляции  $R$  для прогнозов месячного и годового слоя осадков с заблаговременностью 1 год

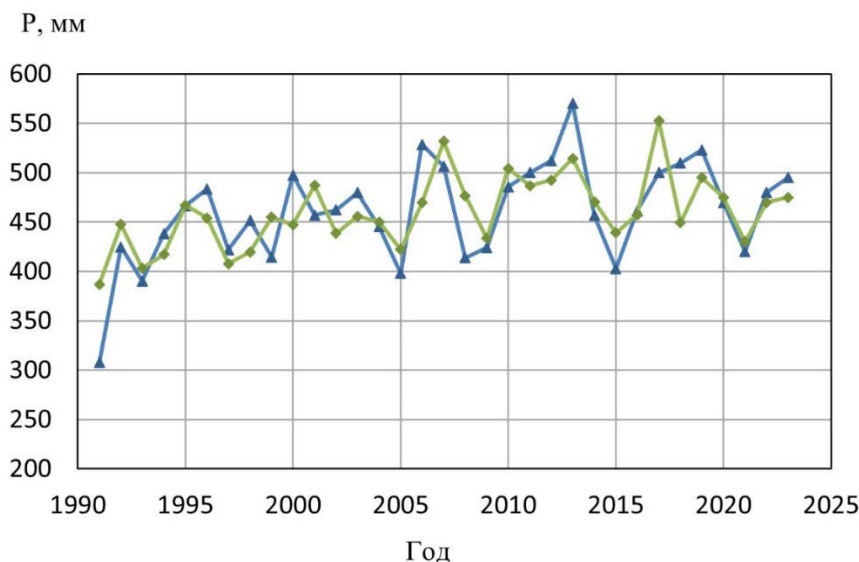
**Table 4.** Values of the correlation coefficient  $R$  for monthly and annual precipitation layer forecasts with a 1-year lead time

Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Печора	0,20	0,26	0,13	0,13	-0,33	0,08	-0,09	-0,14	0,11	0,09	0,16	0,21	-0,09
Северная Двина	0,06	0,12	0,20	0,23	0,02	-0,22	-0,11	0,01	0,15	0,18	0,10	0,11	<b>0,38</b>
Ока	-0,04	-0,09	0,25	0,20	0,10	-0,10	-0,04	0,26	-0,13	<b>-0,50</b>	-0,19	-0,01	0,29
Сылва	0,10	0,09	0,12	0,00	-0,18	0,11	-0,22	<b>0,46</b>	0,39	0,26	-0,09	0,28	0,33
Дон	0,01	0,06	<b>0,48</b>	-0,03	0,34	0,06	0,05	0,08	0,03	0,00	0,00	-0,03	0,02
Малка	-0,16	0,22	0,24	0,30	-0,27	-0,11	0,26	-0,23	0,16	0,17	0,16	<b>-0,40</b>	0,12
Обь	-0,07	0,05	-0,06	0,22	0,08	-0,14	0,17	<b>0,41</b>	-0,03	0,33	0,17	0,05	<b>0,40</b>
Енисей	0,11	0,25	0,28	-0,01	0,11	-0,14	-0,14	0,08	-0,09	0,23	<b>-0,39</b>	0,19	-0,15
Лена	0,30	-0,11	-0,12	-0,18	0,33	0,18	0,24	0,43	0,17	-0,07	-0,34	0,12	0,18
Амур	-0,28	-0,06	0,12	-0,05	0,08	-0,04	-0,07	-0,15	-0,14	0,06	0,25	0,18	0,14
Зея	-0,23	-0,03	-0,06	0,22	<b>0,36</b>	0,25	-0,11	-0,10	-0,09	-0,14	0,03	-0,14	0,05
Ясачная	0,28	-0,13	0,02	-0,06	-0,15	0,23	0,17	0,29	0,05	0,16	0,03	-0,26	<b>0,73</b>

За исключением одного случая, который заслуживает отдельного внимания, все значения коэффициента  $R$  невелики. Для проверки статистической достоверности этих коэффициентов предназначен стандартный критерий Питмена [11]. При длине ряда проверочных прогнозов  $n = 33$  и уровне значимости (риска) критерия 5 % статистически достоверно отличающимися от нуля являются значения  $R$ , которые по абсолютной величине превышают 0,35. В табл. 4 такие коэффициенты выделены жирным шрифтом. Для месячных осадков таких коэффициентов оказалось 7 из 144, то есть примерно 5 %, что полностью соответствует уровню значимости критерия Питмена. Это позволяет сделать вывод об отсутствии статистически достоверной корреляции между фактическими значениями месячного слоя осадков и их прогнозами с заблаговременностью 1 год. Аналогичные результаты были получены для прогнозов месячных осадков большей заблаговременности.

Для годового слоя осадков доля статистически достоверных коэффициентов корреляции оказалась выше: 3 из 12, то есть 25 %. Следовательно, годовой слой осадков модель INM-CM5 прогнозирует на один год вперед несколько точнее, чем месячный.

Удивительно высоким оказался коэффициент  $R = 0,73$  для слоя годовых осадков, выпадающих на водосбор левого притока Колымы – реки Ясачная. Согласно действующим в отечественной практике гидрометеорологического прогнозирования правилам, долгосрочные прогнозы относятся к категории удовлетворительных, если значение коэффициента корреляции  $R$  не ниже 0,6 [1]. Следовательно, имеет место случай успешного сверхдолгосрочного прогнозирования – для данного речного бассейна модель INM-CM5 позволяет удовлетворительно прогнозировать годовой слой осадков с заблаговременностью на один год вперед. В данном случае большую роль сыграла предлагаемая коррекция прогнозов, которая позволила снизить их погрешность в 3,7 раза. График многолетних колебаний фактической годовой суммы осадков и ее прогноза с заблаговременностью 1 год в данном створе представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** График многолетних колебаний фактической годовой суммы осадков (синим) и ее прогноза с заблаговременностью 1 год (зеленым) в створе р. Ясачная – с. Нелемное.

**Fig. 2.** Graph of long-term fluctuations in the actual annual precipitation amount (blue) and its forecast with 1 year lead-time (green) in the river catchment Yasachnaya near Nelemnoye.

В табл. 5 приведены коэффициенты корреляции  $R$  для прогнозов среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха с заблаговременностью 1 год.

**Таблица 5.** Значения коэффициента корреляции  $R$  для прогнозов среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха заблаговременностью 1 год  
**Table 5.** Values of the correlation coefficient  $R$  for forecasts of the average monthly and average annual air temperature in advance of 1 year

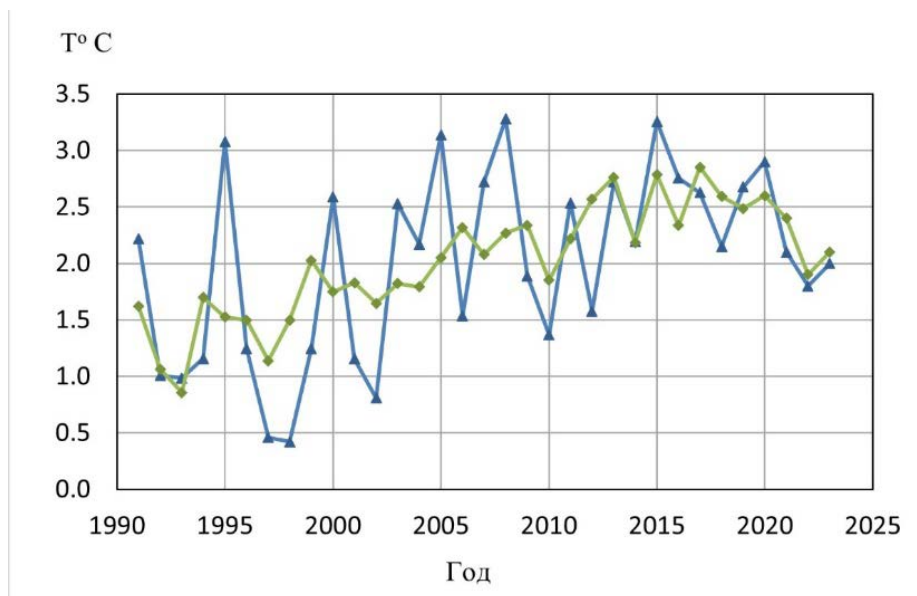
Река	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Печора	<b>-0,38</b>	0,03	0,03	<b>0,48</b>	0,05	-0,01	0,16	-0,11	0,31	<b>0,41</b>	<b>0,60</b>	0,07	<b>0,48</b>
Северная Двина	-0,32	0,03	0,04	<b>0,40</b>	0,15	-0,04	0,17	-0,28	<b>0,36</b>	<b>0,49</b>	<b>0,57</b>	0,05	<b>0,61</b>
Ока	0,02	0,02	0,14	0,34	0,08	-0,15	-0,02	-0,04	<b>0,49</b>	<b>0,42</b>	<b>0,51</b>	0,24	<b>0,48</b>
Сылва	-0,28	0,13	0,19	0,26	0,18	0,08	0,10	0,01	<b>0,41</b>	0,33	0,26	0,08	<b>0,39</b>
Дон	-0,05	-0,09	<b>0,37</b>	<b>0,42</b>	0,20	-0,09	-0,03	0,08	<b>0,42</b>	<b>0,41</b>	<b>0,36</b>	0,31	<b>0,46</b>
Малка	-0,19	0,16	<b>0,43</b>	<b>0,38</b>	0,28	0,27	<b>0,41</b>	<b>0,42</b>	0,19	0,08	0,07	0,01	<b>0,59</b>
Обь	-0,22	0,01	0,09	0,22	0,08	0,19	0,00	0,27	<b>0,54</b>	0,01	-0,05	0,18	0,01
Енисей	0,07	0,09	0,06	0,34	0,18	0,30	0,12	0,34	<b>0,47</b>	0,16	-0,02	0,31	0,25
Лена	0,21	-0,03	0,00	<b>0,47</b>	0,26	0,34	0,03	0,06	<b>0,52</b>	0,21	-0,13	0,18	0,07
Амур	-0,12	0,07	0,35	0,22	0,16	0,13	0,33	0,31	<b>0,37</b>	0,01	0,14	-0,02	<b>0,50</b>
Зея	0,04	-0,09	0,29	<b>0,41</b>	0,15	0,11	0,13	0,17	0,27	0,08	0,17	0,27	0,32
Ясачная	0,10	-0,25	0,19	0,09	0,24	-0,14	-0,11	0,01	<b>0,38</b>	0,00	0,14	0,19	<b>0,36</b>

Статистически достоверные с точки зрения критерия Питмена при уровне значимости 5 % коэффициенты  $R$  выделены жирным шрифтом. Для среднемесячной температуры воздуха таких коэффициентов оказалось 28 из 144, то есть более 19 %. Для среднегодовой температуры воздуха таких коэффициентов оказалось 8 из 12, то есть почти 67 %. Таким образом, среднегодовая температура прогнозируется точнее среднемесячной. В целом модель INM-CM5 позволяет получать сверхдолгосрочные прогнозы температуры воздуха значительно более точные, чем осадков.

Данные табл. 5 свидетельствуют о другом случае успешного сверхдолгосрочного прогнозирования – для бассейна Северной Двины модель INM-CM5 позволяет удовлетворительно прогнозировать среднегодовую температуру воздуха на один год вперед. В данном случае также большую роль сыграла предлагаемая коррекция прогнозов, которая позволила снизить их погрешность в 5,6 раза. График многолетних колебаний фактической среднегодовой температуры воздуха и ее прогноза с заблаговременностью 1 год в данном створе представлен на рис. 3.

В целях оценки возможностей модели INM-CM5 получать сверхдолгосрочные прогнозы внутригодового распределения осадков для каждого года проверочного периода с 1991 по 2023 год вычислялся коэффициент корреляции  $R_p$  между рядом из 12 фактических значений месячного слоя осадков и рядом из 12 значений их сверхдолгосрочных прогнозов. Среднее

значение  $\bar{R}_p$  этих 33 коэффициентов характеризует качество сверхдолгосрочного прогнозирования внутригодового распределение осадков.



**Рис. 3.** График многолетних колебаний фактической среднегодовой температуры воздуха (синим) и ее прогноза с заблаговременностью 1 год (зеленым) в створе р. Северная Двина – гп. Взвоз.

**Fig. 3.** Graph of long-term fluctuations of the actual average annual air temperature (blue) and its forecast with 1 year lead time (green) in the river catchment Severnaya Dvina near gp. Vzvoz.

Качество сверхдолгосрочного прогнозирования внутригодового распределения температуры воздуха характеризует осредненный по 33 годам проверочного периода коэффициент  $\bar{R}_T$ , полученный аналогичным образом. В табл. 6 показатели  $\bar{R}_p$  и  $\bar{R}_T$  приведены для прогнозов с заблаговременностью 1 год.

Среднеквадратическая погрешность показателей  $\bar{R}_p$  и  $\bar{R}_T$  не превышает 0,06 [1, 11]. Следовательно, все значения этих показателей в табл. 8 статистически достоверно отличаются от нуля. Они положительны, за исключением показателя  $\bar{R}_p$  для реки Дон. Отрицательное значение  $\bar{R}_p = -0,24$  свидетельствует о неудачности прогнозов внутригодового распределения осадков, выпадающих на водосбор данной реки. Для 8 из 12 речных бассейнов значения  $\bar{R}_p$  превышают 0,6, то есть довольно высоки и свидетельствуют об удовлетворительном прогнозировании внутригодового распределения осадков. Для температуры воздуха все показатели  $\bar{R}_T$

близки к единице, что свидетельствует о высоком качестве прогнозирования внутригодового распределения этой метеорологической характеристики. Для сверхдолгосрочных прогнозов с заблаговременностью более 1 года показатели  $\bar{R}_p$  и  $\bar{R}_T$  в целом оказались немного меньше, однако вывод об удовлетворительных возможностях сверхдолгосрочного прогнозирования внутригодового распределения месячного слоя осадков и среднемесячной температуры воздуха для большинства рассматриваемых речных бассейнов сохраняется.

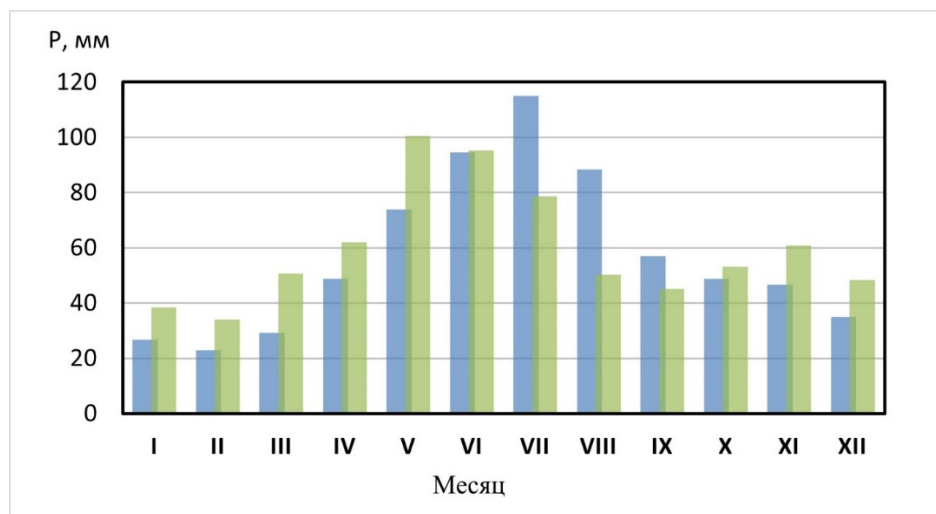
**Таблица 6.** Значения показателей  $\bar{R}_p$  и  $\bar{R}_T$  качества прогнозирования внутригодового распределения осадков и температуры воздуха с заблаговременностью 1 год

**Table 6.** Values of indicators  $\bar{R}_p$  and  $\bar{R}_T$  quality of forecasting the intra-annual distribution of precipitation and air temperature with 1 year lead time

Индекс	Река	$\bar{R}_p$	$\bar{R}_T$
70421	Печора	0,61	0,96
70072	Северная Двина	0,73	0,96
75328	Ока	0,14	0,96
76692	Сылва	0,34	0,97
78021	Дон	-0,24	0,97
84192	Малка	0,30	0,95
10010	Обь	0,62	0,97
9002	Енисей	0,78	0,98
3021	Лена	0,85	0,98
5024	Амур	0,89	0,98
6295	Зея	0,92	0,98
1578	Ясачная	0,79	0,98

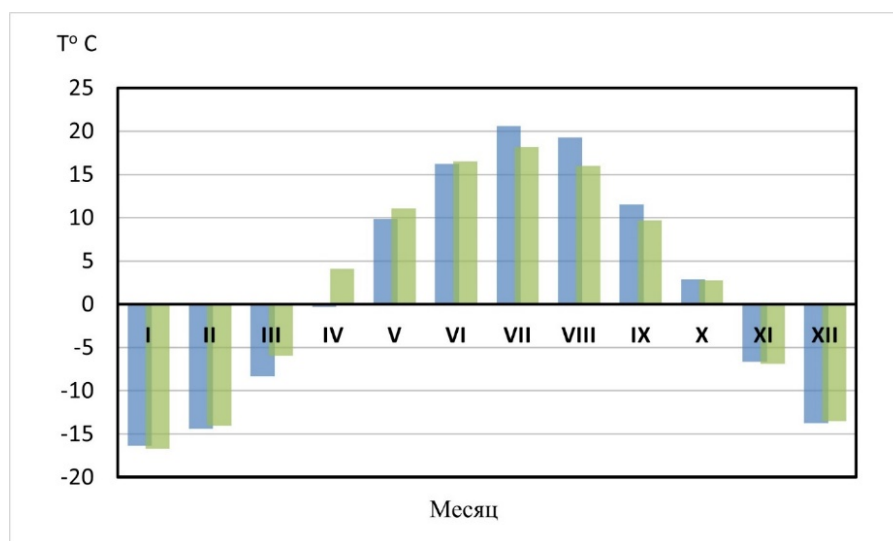
Типичную ситуацию демонстрируют рис. 4 и 5, на которых для осадков и температуры воздуха приведены осредненные по всем 33 годам графики их фактического внутригодового распределения и его прогноза с заблаговременностью 1 год в створе р. Обь – г. Камень-на-Оби.

Таким образом, модель INM-CM5 вполне адекватно описывает климатические особенности большинства регионов России и позволяет получать для них удовлетворительные сверхдолгосрочных прогнозы внутригодового распределения важнейших метеорологических характеристик условий формирования речного стока.



**Рис. 4.** Осредненные графики фактического внутригодичного распределения осадков (синим) и его прогноза с заблаговременностью 1 год (зеленым) в створе р. Обь – г. Камень-на-Оби.

**Fig. 4.** Averaged graphs of the actual intra-annual precipitation distribution (blue) and its forecast with 1 year lead time (green) in the river catchment Ob near the city of Kamen-na-Obi.



**Рис. 5.** Осредненные графики фактического внутригодичного распределения температуры воздуха (синим) и его прогноза с заблаговременностью 1 год (зеленым) в створе р. Обь – г. Камень-на-Оби.

**Fig. 5.** Averaged graphs of the actual intra-annual distribution of air temperature (blue) and its forecast with 1 year lead time (green) in the river catchment Ob near the city of Kamen-na-Obi.

## Заключение

Выполнен анализ получаемых с помощью модели климата INM-CM5 сверхдолгосрочных прогнозов месячного и годового слоя осадков, среднемесячной и среднегодовой температуры приземного слоя воздуха. Ретроспективные модельные прогнозы с заблаговременностью 1–5 лет сравнивались с фактическими данными для периода с 1991 по 2023 год.

Прогнозы проверялись для 12 речных бассейнов, расположенных в различных климатических и физико-географических условиях России. Исследуемые реки имеют различные площади водосбора, условия формирования стока и водный режим. Состав рассматриваемых речных бассейнов позволяет судить о возможностях сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик формирования речного стока с помощью модели INM-CM5 для территории России в целом.

Статистический анализ рядов проверочных прогнозов позволил получить следующие выводы и результаты.

1. Для устранения систематических ошибок анализируемых прогнозов применялся метод коррекции на основе линейной регрессии, который позволяет снизить погрешность сверхдолгосрочных прогнозов осадков почти в два раза, а температуры воздуха почти в три раза.

2. В большинстве случаев корреляция между фактическими значениями осадков и температуры воздуха и их прогнозами статистически достоверна лишь в отдельных случаях.

3. При условии использования предлагаемого метода коррекции модель позволяет с заблаговременностью 1 год прогнозировать годовой слой осадков для водосбора реки Ясачная (приток Колымы) и среднегодовую температуру воздуха для водосбора Северной Двины с удовлетворительной точностью.

4. Предложены показатели качества сверхдолгосрочных прогнозов внутригодового распределения осадков и температуры воздуха. Прогнозы внутригодового распределения осадков оказались удовлетворительными для 8 речных бассейнов из 12. Прогнозы внутригодового распределения температуры воздуха оказались хорошими для всех 12 речных бассейнов. Таким образом, модель INM-CM5 вполне адекватно описывает климатические особенности большинства регионов России.

Выполненный анализ дает оценку возможностей использования модели климата INM-CM5 для сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик формирования стока рек России.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке гранта РФФ 22-17-00247.

## Список литературы

1. Борц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 339. 198 с.

2. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162-175.
3. Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Влияние неопределенности метеорологических условий периода заблаговременности на точность долгосрочных прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 36-46.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Гидрологическая наука и практика XXI-го века // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 5-11.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
6. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Яковлева Н.Г. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
7. Володин Е.М. Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CM5-0 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 5-13.
8. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2018. 300 с.
9. Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Сверхдолгосрочный прогноз стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 47-56.
10. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24-39.
11. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. М.: АИП, 2017. 151 с.
12. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
13. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. WMO, 2009. 302 p.
14. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction // WMO-No. 1274. WMO, 2021. 67 p.
15. Predictability of Weather and Climate / editors T. Palmer, R. Hagedorn. – Cambridge University Press, 2006. – 635 p.
16. Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al. Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales // Hydrological Sciences Journal. 2017. Vol. 62, no.16. P. 2753-2768.
17. Robertson D.E., Wang Q.J. A Bayesian Approach to Predictor Selection for Seasonal Streamflow Forecasting // Journal of Hydrometeorology. 2012. Vol. 13, is. 1. P. 155-171.
18. Shukla S., Lettenmaier D.P. Seasonal Hydrologic Prediction in the United States: Understanding the Role of Initial Hydrologic Conditions and Seasonal Climate Forecast Skill // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15, no. 11. P. 3529-3538.
19. Tuteja N.K., Shin D., Laugesen R., Khan U., Shao Q., Wang E., Li M., Zheng H., Kuczera G., Kavetski D., Evin G., Thyer M., MacDonald A., Chia T., B. Le. Experimental evaluation of the dynamic seasonal streamflow forecasting approach: Technical Report. Bureau of Meteorology, Melbourne, 2011. 108 p.
20. Volodin E.M., Diansky N.A., Gusev, A.V. Simulation and Prediction of Climate Changes in the 19th to 21st Centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Model of the Earth's Climate System // Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys. 2013. Vol. 49. P. 347-366.
21. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin, V.Y., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G. Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS climate model // Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys. 2017. Vol. 53. P. 142-155.
22. Wang Q.J., Robertson D.E., Chiew F.H.S. A Bayesian joint probability modeling approach for seasonal forecasting of streamflows at multiple sites // Water Resources Research. 2009. Vol. 45. P. W05407.
23. Wood A.W., Maurer E.P., Kumar A., Lettenmaier D.P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States // J. Geophys. Res. Atmos. 2002. Vol. 107. P. 4429-4444.

24. Zhu E., Yuan, X., Wood A.W. Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework // *Nat Commun.* 2019. Vol. 10. P. 1237.

### References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
2. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A. Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175 [in Russ.].
3. Borsch S.V., Vil'fand R.M., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Assessment of the influence of uncertainty in meteorological elements on the error of long-term river runoff forecasts. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, no. 4, pp. 36-46 [in Russ.].
4. Borshch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M. Hydrological Science and Practice in the 21st Century. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2023, no. 12, pp. 5-11 [in Russ.].
5. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Izd-vo FGBU «Gidrometcentr Rossii», 2023, 200 p. [in Russ.].
6. Volodin E.M., Galin V.YA., Gricun A.S. i dr. Matematicheskoe modelirovaniye Zemnoy sistemy. Pod red. YAKovleva N.G. Moscow, MAKS Press, 2016, 328 p. [in Russ.].
7. Volodin E.M. Possible Climate Change in Russia in the 21st Century Based on the INM-CM5-0 Climate Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2022, vol. 47, no. 5, pp. 327-333. DOI: 10.3103/S1068373922050016.
8. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 300 p. [in Russ.].
9. Semenova N.K., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Extended Streamflow Prediction for Russian Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 1019-1028. DOI: 10.3103/S1068373923120026.
10. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 169-179. DOI: 10.3103/S1068373919030026.
11. Khristoforov A.V., Yumina N.M. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnoe posobie. Moscow, APR publ., 2017, 151 p. [in Russ.].
12. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
13. WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO, 2009, 302 p.
14. WMO-No. 1274. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction, WMO, 2021, 67 p.
15. Predictability of Weather and Climate. editors T. Palmer, R. Hagedorn. – Cambridge University Press, 2006, 635 p.
16. Prudhomme C., Hannaford J., Harrigan S. et al. Hydrological Outlook UK: An Operational Streamflow and Groundwater Level Forecasting System at Monthly to Seasonal Time Scales. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, vol. 62, no.16, pp. 2753-2768.
17. Robertson D.E., Wang Q.J. A Bayesian Approach to Predictor Selection for Seasonal Streamflow Forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, Vol. 13, no. 1, pp. 155-171.
18. Shukla S., Lettenmaier D.P. Seasonal Hydrologic Prediction in the United States: Understanding the Role of Initial Hydrologic Conditions and Seasonal Climate Forecast Skill. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, vol. 15, no. 11, pp. 3529-3538.
19. Tuteja N.K., Shin D., Laugesen R., Khan U., Shao Q., Wang E., Li M., Zheng H., Kuczera G., Kavetski D., Evin G., Thyer M., MacDonald A., Chia T., B. Le. Experimental evaluation of the dynamic seasonal streamflow forecasting approach: *Technical Report. Bureau of Meteorology*, Melbourne, 2011, 108 p.

20. Volodin E.M., Diansky N.A., Gusev, A.V. Simulation and Prediction of Climate Changes in the 19th to 21st Centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Model of the Earth's Climate System. *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys.*, 2013, vol. 49, pp. 347-366.

21. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostrykin S.V., Galin, V.Y., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G. Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS climate model. *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys.*, 2017, Vol. 53, pp. 142-155.

22. Wang Q.J., Robertson D.E., Chiew F.H.S. A Bayesian joint probability modeling approach for seasonal forecasting of streamflows at multiple sites. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, P. W05407.

23. Wood A.W., Maurer E.P., Kumar A., Lettenmaier D.P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2002, vol. 107, pp. 4429-4444.

24. Zhu E., Yuan, X., Wood A.W. Benchmark decadal forecast skill for terrestrial water storage estimated by an elasticity framework. *Nat Commun.*, 2019, vol. 10, 1237 p.

Поступила 08.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024;  
принята в печать 10.12.2024.

Submitted 08.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024;  
accepted for publication 10.12.2024.