

УДК 556.013

Расчет половодий на р. Сухоне на основе совместного использования моделей ECOMAG и COSMO-Ru

**Е.В. Чурюлин^{1,2}, И.Н. Крыленко^{1,3,4}, Н.Л. Фролова¹,
Б.М. Беляев¹, И.А. Розинкина^{1,2}**

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

³ Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия
evgenychur@gmail.com

Продемонстрирован новый метод гидрологического моделирования в современных климатических условиях, основанный на совместном применении модели формирования стока ECOMAG с использованием выходной продукции негидростатической модели атмосферы COSMO-Ru для расчетов характеристик весеннего половодья вблизи г. Великий Устюг. Получены удовлетворительные расчетные характеристики весенних половодий на реке Сухоне за период с 2013 по 2018 год, включая наводнение стоково-заторного генезиса в мае 2016 года вблизи г. Великий Устюг.

Ключевые слова: модель формирования стока, негидростатическая модель атмосферы, атмосферные осадки, расчет характеристик наводнений

Flood estimation for the Sukhona River based on the joint use of ECOMAG and COSMO-Ru models

**E.V. Churiulin^{1,2}, I.N. Krylenko^{1,3,4}, N.L. Frolova¹,
B.M. Belyaev¹, I.A. Rozinkina^{1,2}**

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

³ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁴ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
evgenychur@gmail.com

A new runoff forecast methods is presented for modern climate conditions. It is based on the joint use of the ECOMAG runoff formation model and the output products of COSMO-Ru nonhydrostatic atmospheric model to calculate spring floods on the Sukhona river near Velikiy Ustyug. Satisfactory calculated characteristics of spring floods were obtained for the period of 2013–2018 including the runoff-ice-jam flood in May 2016 near Velikiy Ustyug.

Keywords: runoff formation model, nonhydrostatic atmospheric model, precipitation, calculation of flood characteristics

Введение

Перспективным направлением при расчете характеристик наводнений является метод совместного гидрологического и атмосферного моделирования. В этом случае моделирование формирования стока на водосборе должно осуществляться с использованием в качестве входной информации о метеорологических характеристиках (атмосферном форсинге) доступных оперативных данных синоптических измерений, а также результатов численного моделирования процессов в атмосфере. На рис. 1 представлена схема последовательной обработки данных различного масштаба, необходимая при синтезе гидрологического и атмосферного моделирования.

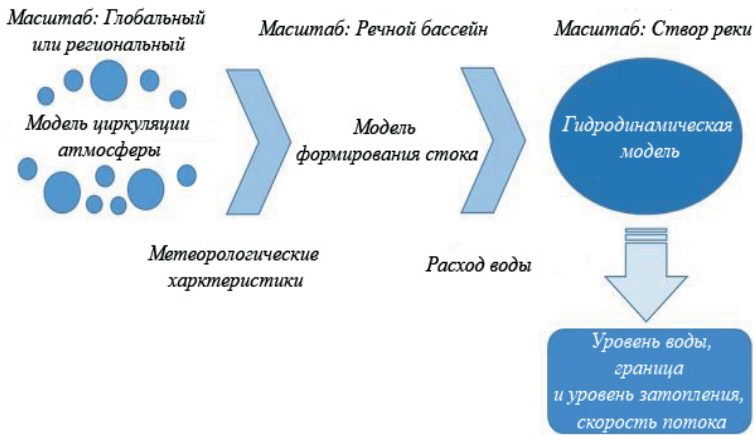


Рис. 1. Схема синтеза атмосферного и гидрологического моделирования.
Fig. 1. The synthesis diagram of the atmospheric and hydrological modelling.

Совместное атмосферное и гидрологическое моделирование позволяет решать разноплановые задачи, связанные с затоплением территории, как в целях краткосрочного прогноза, так и для разнообразных сценарных расчетов. Такой подход может быть эффективен при анализе и прогнозе экстремальных гидрометеорологических событий.

Данная работа посвящена описанию эксперимента применения модели формирования стока ECOMAG (автор – Ю.Г. Мотовилов [10, 11]) с использованием выходной продукции мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru (на основе модели консорциума COSMO, <http://www.cosmo-model.org/>) для расчета гидрографов стока половодья вблизи г. Великий Устюг. Актуальность работы связана с вопросами гидрологической безопасности г. Великий Устюг с населением около 32 тыс. чел. и прилегающих территорий. Город расположен на правом берегу р. Сухоны в месте впадения р. Юг и на правобережных поймах

р. Малой Северной Двины, начинающейся у города при слиянии рек Сухоны и Юга. В период наводнений стоково-заторного генезиса затоплению подвержено более 2/3 городской территории. Наиболее выдающимися событиями за последние 20 лет являлись наводнения 1998 и 2016 гг. [1, 17].

Выбранный ключевой участок реки достаточно хорошо изучен гидрологами, в том числе в ходе разработки мероприятий по снижению неблагоприятного воздействия вод [2, 15]. Однако пост, измеряющий расход воды, имеется только на р. Сухоне, а на р. Юге он был закрыт в конце 1980-х гг. Одним из возможных решений при недостатке данных гидрологических наблюдений является применение модели формирования стока (в том числе для наиболее полного и заблаговременного учета особенностей формирования половодий на исследуемой территории). Данный тип моделей по данным о метеорологических характеристиках (температуре, осадках, влажности воздуха) и сведениях о подстилающей поверхности водосбора позволяет рассчитывать основные процессы формирования стока и, как результат, расходы воды в любой точке речной сети. Используемая в работе модель формирования стока ECOMAG показала высокую эффективность при исследованиях стока северных рек, в том числе для бассейна Северной Двины [4, 18, 20].

Одним из подходов в обеспечении гидрологических моделей метеорологической информацией, помимо использования данных действующей сети метеорологических станций, является применение результатов моделирования на основе региональных моделей циркуляции атмосферы [7]. Результаты совместного применения модели ECOMAG и региональной метеорологической модели WRF показали перспективность данного подхода для разработки методик краткосрочного прогноза для различных регионов, например для бассейна р. Буреи [12], системы Москворецких водохранилищ [5].

В данном исследовании проведена оценка возможности применения в качестве входных данных для моделирования формирования стока в бассейне Северной Двины метеорологической информации по результатам расчетов на основе мезомасштабной модели циркуляции атмосферы COSMO-Ru, позволяющей получать всю необходимую метеорологическую информацию на различных сетках, например COSMO-Ru13 – шаг сетки 13 км, COSMO-Ru7 – шаг сетки 7 км, COSMO-Ru2 – шаг сетки 2,2 км и другие [8]. Данная модель на основе решений Центральной методической комиссии Росгидромета в 2011, 2017 и 2018 гг. официально признана базовой моделью численного прогнозирования элементов погоды для территории Российской Федерации. Различные конфигурации данной модели с различной пространственной дискретизацией позволяют получать прогнозы с заблаговременностью до 2–5 суток. Прогноз приземной температуры воздуха, количества осадков, влажности воздуха и других метеорологических характеристик выполняется на регулярной

сетке с пространственным разрешением от 1 до 13 км за каждый метеорологический срок (каждые 3 ч) с учетом характеристик подстилающей поверхности [8, 13, 14]. Следует отметить, что для адекватного описания пространственного распределения осадков либо накопленных снегозапасов принципиальным является пространственное разрешение модели атмосферы.

В ходе выполнения задачи исследования решался вопрос обеспечения модели формирования стока ECOMAG продукцией мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru. Для осуществления поставленной задачи были разработаны математические алгоритмы адаптации и усвоения данных численного прогноза погоды моделью ECOMAG. В результате на основе метеорологической и гидрологической модели за период 2013–2018 гг. проведено моделирование и выполнена оценка результатов моделирования гидрографов стока.

1. Адаптация модели ECOMAG для моделирования гидрографов стока в районе г. Великий Устюг

Модель формирования стока ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics) разрабатывалась Ю.Г. Мотовиловым на базе достижений школы физико-математического моделирования Л.С. Кучмента Института водных проблем РАН начиная с 1990-х годов [19]. Модель учитывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и речного стока. Пространственное распределение параметров модели осуществляется за счет выделения ландшафтных элементов (элементарных водосборов) и учета доли различных типов подстилающей поверхности (почв, землепользования) в их пределах.

Моделирование гидрологических процессов на каждом ландшафтном элементе выполняется для четырех уровней: для верхнего слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Схема заканчивается рассмотрением процессов трансформации воды в речной сети. Основные расчетные уравнения модели и расчетные алгоритмы приведены в работах автора модели, например в [10, 11, 19].

В настоящее время ECOMAG представляет собой информационно-моделирующую систему, включающую помимо ядра комплекса – модели формирования стока – различные средства информационной и технологической поддержки, такие как базы данных параметров подстилающей поверхности, тематические цифровые электронные карты, геоинформационные модули для схематизации водосборов и визуализации результатов расчетов, что позволяет применять модель для решения различных научных и водохозяйственных задач, включая краткосрочные

и долгосрочные прогнозы стока, сценарные оценки изменений стока в условиях изменения климата и пр. [10, 11].

В качестве исходных данных в работе использовалась схематизация модели и параметры, полученные для всего бассейна Северной Двины, связанные с оценкой влияния климата на изменения стока [18, 20]. Для адаптации модели для района г. Великий Устюг использовались данные среднесуточных расходов воды на гидрологическом посту (ГП) р. Сухона – д. Каликино (площадь водосбора 49200 км²), расположенном в 36 км выше узла слияния Сухоны и Юга, и ГП р. Юг – п. Гаврино (площадь водосбора 34800 км², закрыт в 1989 г.) (рис. 2).

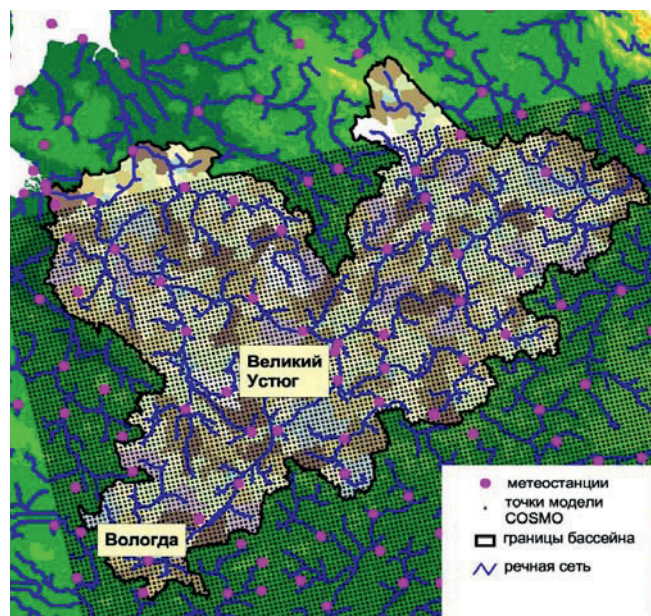


Рис. 2. Удельные водосборы при схематизации бассейна Северной Двины в модели ECOMAG, расположение метеорологических станций и регулярной сетки модели COSMO-Ru.

Fig. 2. Elementary catchments according to the ECOMAG model schematization of the basin of Northern Dvina River, the location of meteorological stations and the regular grid of the COSMO-Ru model.

На этапе адаптации модели все расчеты проводились по данным метеорологических станций в бассейне. Для калибровки модели использовались данные за период с 1969 по 1984 г., для верификации – за период с 1985 по 2014 г. За период с 1969 по 1984 г. (15 лет) в районе г. Великий Устюг из-за образования заторов льда наблюдались три катастрофических подъема уровня воды на Северной Двине, превышающие уровень неблагоприятных явлений. В течение 1985–2014 гг. (30 лет) в районе города было отмечено пять наводнений, при этом в 1998 г. была превышена

отметка уровня опасных явлений. В процессе калибровки в модели ЕСOMAG задаются коэффициенты (множители), которые влияют на величину основных параметров в пределах всего речного бассейна, всего в калибровке участвует 10 параметров. Для створа ГП Великий Устюг получены несколько отличающиеся по сравнению со средними для бассейна Северной Двины значения двух параметров, связанных с гидроклиматической обстановкой: множителя на коэффициент испарения и коэффициента на критическую температуру таяния. Эмпирический коэффициент испарения определяет интенсивность испарения в зависимости от дефицита влажности воздуха и влажности почвы. В модели задаются значения коэффициентов испарения для каждого типа ландшафтов, а для калибровки используется множитель, позволяющий повысить или понизить значение коэффициента испарения для всех типов ландшафтов на одну и ту же величину, что позволяет сохранить особенности пространственного распределения коэффициентов испарения при калибровке. При увеличении множителя на коэффициент испарения пропорционально увеличиваются коэффициенты испарения для всех типов ландшафтов, таким образом увеличивается величина испарения и соответственно снижаются объемы стока и значения максимальных расходов. Для всего бассейна Северной Двины оптимальным явилось значение множителя на коэффициент испарения 0,50, для наилучшего совпадения по ГП р. Сухона – д. Каликино и р. Юг – п. Гаврино – 0,55. Критическая температура таяния снега (температура, при которой начинается снеготаяние) является одним из достаточно распространенных калибровочных параметров моделей формирования стока и предполагает, что в связи с неоднородностью хода температур в течение суток и в пределах элементарного водосбора данное значение может отличаться от физически обоснованного 0 °С. При уменьшении значения данного параметра происходит сдвиг начала половодья на более ранние сроки. Для всего бассейна Северной Двины оптимальным являлось значение поправочного коэффициента к коэффициенту испарения 1 °С. Для наилучшего совпадения по ГП р. Сухона – д. Каликино и р. Юг – п. Гаврино величина поправочного коэффициента для критической температуры стаивания была снижена до 0,5 °С. Данные различия связаны с тем, что рассматриваемые створы находятся в южной части бассейна Северной Двины, для которой характерны более высокие значения испарения и более раннее начало снеготаяния, что и было косвенно учтено при изменении указанных параметров модели. Остальные параметры модели, относящиеся к другим процессам (фильтрации, стеканию по различным горизонтам почв и т. д.), остались такими же, как были получены в предшествующих работах для всего бассейна [18].

В итоге было получено хорошее соответствие смоделированных и наблюдаемых гидрографов по ГП р. Сухона – д. Каликино и р. Юг – п. Гаврино, определяющих расходы воды у г. Великий Устюг (рис. 3) при моделировании на основе данных метеорологических станций.

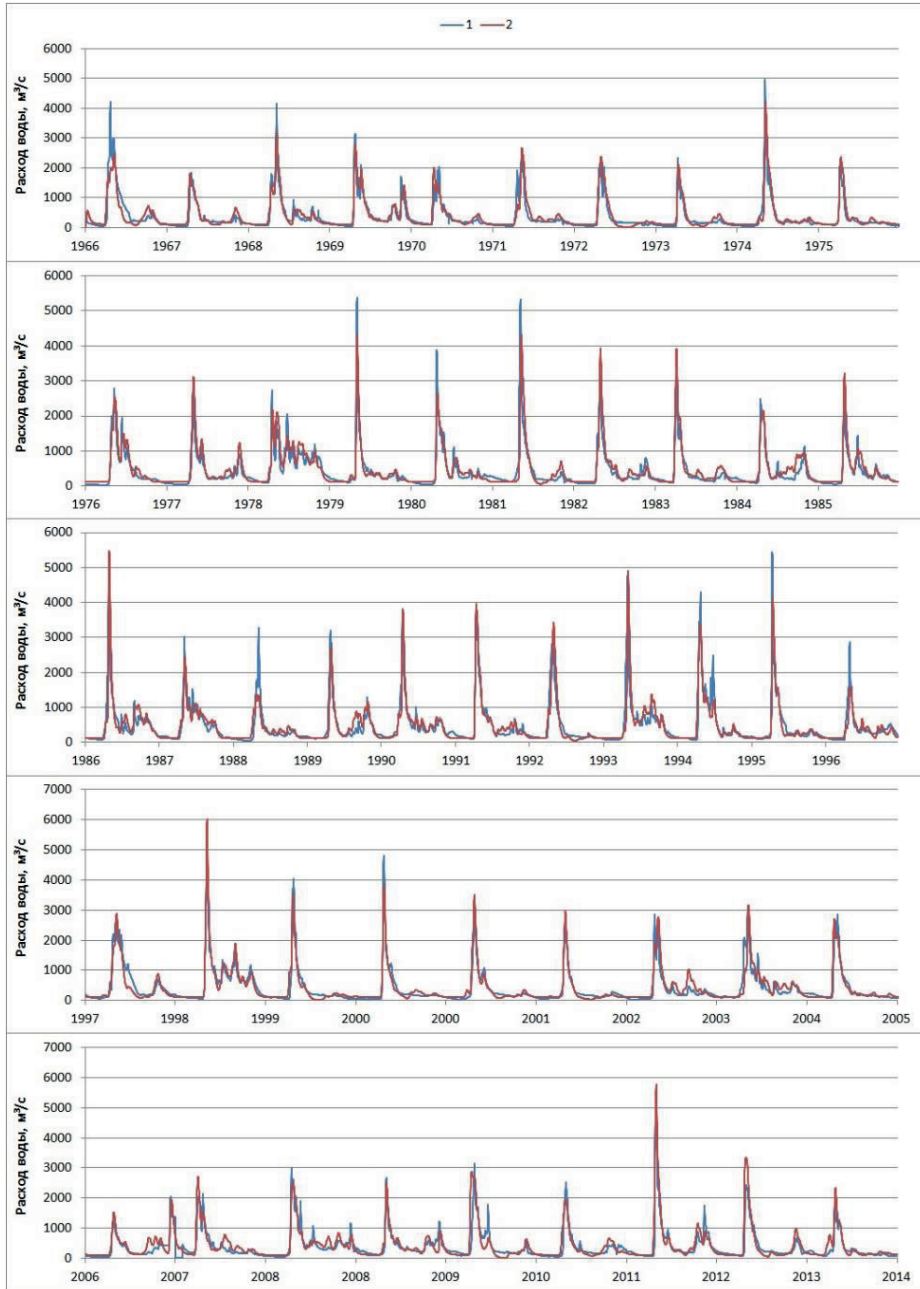


Рис. 3. Фактический (1) и рассчитанный на основе модели ECOMAG (2) гидрографы за 1966–2014 гг. для гидрологического поста р. Сухона – д. Каликино.

Fig. 3. Actual (1) and simulated on the basis of the ECOMAG model (2) hydrographs for the years 1966–2014 for the hydrological station on the Sukhona River – Kalikino.

Для оценки качества результатов моделирования использовались критерий Нэша – Сатклифа (NSE) [21] для сравнения суточных значений смоделированных и фактических расходов воды за весь период моделирования. Отдельно только за период половодий для сопоставления максимальных расходов воды половодья и объемов стока за половодье использовался критерий эффективности методики S/σ , где S – среднеквадратическое отклонение фактических и смоделированных величин; σ – среднеквадратическое отклонение исследуемой величины. Если $0,5 \leq S/\sigma \leq 0,8$, принято, что качество методики удовлетворительное; если $S/\sigma \leq 0,5$ – качество методики хорошее [6]. По итогам калибровки можно заключить, что в период с 1969 по 1984 г. на основе критерия S/σ модель с удовлетворительным качеством описывает максимальные расходы воды и объем половодья по ГП р. Сухона – д. Каликино и р. Юг – п. Гаврино. По критерию Нэша – Сатклифа (NSE) модель дает хорошие результаты для рассматриваемых постов (табл. 1). Для периода верификации за период с 1985 по 2014 г. для ГП р. Сухона – д. Каликино получены близкие к периоду калибровки значения критерия NSE (0,81 и 0,83 соответственно), для ГП р. Юг – п. Гаврино второй период включал лишь 5 лет с данными наблюдений и критерий соответствия NSE несколько ниже (0,84 за период калибровки и 0,79 за период верификации) В целом, за период с 1969 по 2014 г. для рассматриваемых постов получены удовлетворительные результаты по критерию S/σ и хорошие результаты по критерию Нэша – Сатклифа.

Таблица 1. Оценка соответствия фактических и расчетных гидрографов по итогам калибровки и верификации модели в створах ГП р. Сухона – д. Каликино и р. Юг – п. Гаврино

Table 1. The conformity assessment of actual and calculated hydrographs on the basis of calibration and verification of the model in the gauges of hydrological stations of the Sukhona River (Kalikino) and Yug River (Gavrino)

Пост	1969-1984			1969-2014		
	S/σ		NSE	S/σ		NSE
	Макс. расход	Объем половодья		Макс. расход	Объем половодья	
Каликино	0,59	0,52	0,81	0,61	0,52	0,83
Гаврино	0,47	0,65	0,84	0,64	0,63	0,84

2. Использование мезомасштабной модели COSMO-Ru для обеспечения метеорологической информацией модели ECOMAG

Для обеспечения прогностической метеорологической информацией модели формирования стока ECOMAG использовалась система атмосферного моделирования по ограниченной территории COSMO-Ru с шагом сетки 7 км. В работе использовались значения прогнозов

метеорологических элементов с заблаговременностью до 72 ч. Для получения информации из модели COSMO-Ru производилось раскодирование GRIB-файлов, содержащих информацию в узлах расчетной сетки. После первичной обработки данных и их группировки была написана специальная программа на программном языке Python. Программа предназначена для поиска ближайшего к метеорологической станции узла сетки COSMO-Ru7, ближайших узлов в радиусе 7 км, ближайших узлов в радиусе 15 км, статистической обработки полученных результатов и их визуализации. Полученные модельные данные сравнивались с данными стандартных синоптических наблюдений (независимый материал), поступающих в виде синоптического кода SYNOP по каналам связи Всемирной метеорологической организации.

Задача по обеспечению метеорологической информацией водосбора Северной Двины по модели COSMO-Ru7 была реализована для области счета, используемой синоптиками прогностических центров на Европейской части России при составлении ежедневных прогнозов погоды (помечена на рис. 4 синим цветом) с шагом 7 км между узлами регулярной сетки.

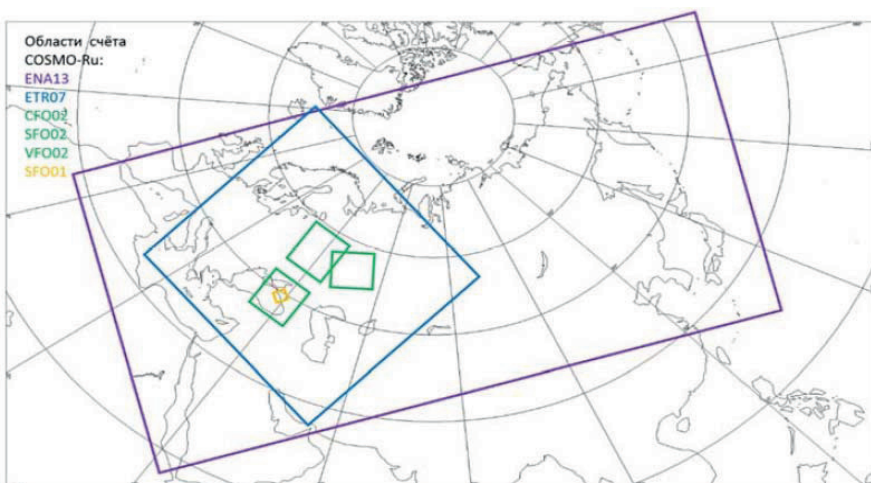


Рис. 4. Области моделирования на основе COSMO-Ru по состоянию на июнь 2017 г. Фиолетовым изображены границы счета ENA13, синим – ETR07, зеленым – области счета с шагом 2 км, оранжевым – 1 км.

Fig. 4. The simulation areas based on COSMO-Ru for the June 2017. Violet shows the boundaries of the ENA13 calculation area, blue represents the ETR07 area, green shows the counting areas with a step of 2 km, orange with a step of 1 km.

Дополнительно для того, чтобы ускорить процесс работы с моделью и выходящими полями данных, было принято решение о создании ограничивающей области (водосбор Северной Двины) с центром модельной сетки в г. Великий Устюг. В результате работы с моделью COSMO-Ru7 получены поля метеорологических данных за период с 01.01.2011

по 18.09.2018 с временным шагом 3 ч и заблаговременностью до 72 ч, данные прогнозов обновлялись ежедневно. В результате для одного календарного дня было сформировано четыре прогнозных значения (прогнозы на 00 ч, 24 ч, 48 ч и 72 ч). Для поставленной задачи использовались поля приземных значений (на высоте 2 м) температуры воздуха, температуры точки росы, относительной влажности и атмосферных осадков.

В своем исследовании мы использовали данные с 68 метеорологических станций, располагающихся на водосборе Северной Двины или вблизи него. Наибольший интерес представляли данные с информацией о приземной температуре воздуха, температуре поверхности почвы, температуре точки росы, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра на высоте 10 м и атмосферных осадках, регулярно поступающие на основе синоптического кода SYNOP с дискретностью 3 ч регулярно в оперативном режиме. Для усвоения метеорологических данных гидрологической моделью полученные данные были усреднены до суточной дискретности. Для сопоставления с модельными данными находились ближайшие от метеорологической станции узлы сетки COSMO-Ru и определялись кратчайшие расстояния, после чего формировались связи метеостанция – кратчайший узел узла сетки. В результате на водосборе Северной Двины и вблизи него было сформировано 52 пары данных измерений и моделирования и произведена оценка полученных данных моделирования (рис. 5). Результаты оценки для метеорологической станции представлены в табл. 2. Они показывают, что данные модели COSMO-Ru7 достаточно реалистично воспроизводят ход основных метеорологических элементов и могут быть использованы в гидрологической модели. По верификационным графикам за 2018 г. на примере метеорологической станции Сыктывкар (рис. 5) видно, что прогноз приземной температуры воздуха (с заблаговременностью 24 ч) в большинстве случаев соответствует измеренным значениям температуры на метеостанциях. Наибольшая точность прогноза наблюдается за период с устойчивым снежным покровом. Следует отметить, что наибольшие погрешности (до 4–5 °С) в прогнозе приземной температуры воздуха были зафиксированы с 26.03.2018 по 10.04.2018. Данное явление вызвано таянием снежного покрова и ошибками прогноза вблизи снежной кромки [16].

Прогноз температуры точки росы также хорошо соответствует измененным значениям в подавляющем большинстве случаев. Наиболее сложная ситуация наблюдается при прогнозе атмосферных осадков. При прогнозе осадков следует выделить несколько временных периодов. Для осадков в холодный период года наблюдаются очень хорошие совпадения как по времени выпадения, так и по суммарному количеству выпавших осадков. Для осадков в теплый период года наблюдается хорошее совпадение по времени выпадения осадков, но в большинстве случаев наблюдается завышение количества выпавших осадков. Применение модели COSMO-Ru позволило получить поля метеорологических данных

не только за текущий день, но и использовать прогнозные поля с заблаговременностью до 72 ч, что позволило запустить тестовые расчеты на основе гидрологической модели в прогнозном режиме.

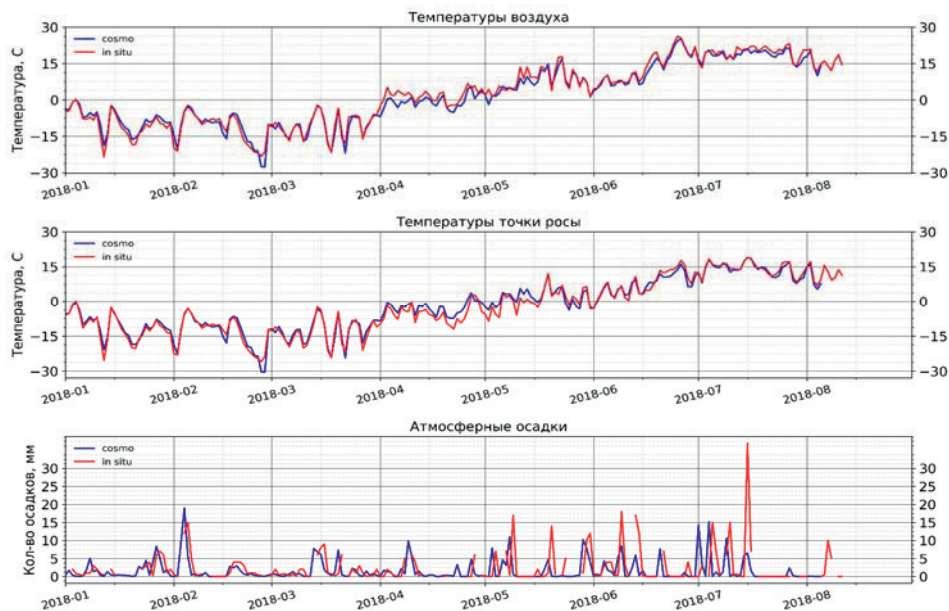


Рис. 5. График фактических и модельных данных на метеорологической станции Сыктывкар за период с 01.01.2018 по 10.08.2018. Синим цветом изображены модельные данные, красным – фактические.

Fig. 5. The graph of actual and model data at the Syktyvkar meteorological station for the period from 01.01.2018 to 10.08.2018. The model data is shown in blue, the actual data in red.

3. Анализ результатов совместного применения модели ECOMAG и модели COSMO-Ru

Моделирование гидрографов половодий на основе совместного применения моделей ECOMAG и COSMO-Ru проводилось за период с 2013 по 2018 г. с суточным шагом. Для этого полученные по модели COSMO-Ru данные о приземной температуре воздуха, температуре точки росы, осадках для каждой расчетной ячейки за метеорологические сроки приводились к суточному осреднению и преобразовывались в требуемые для расчетов на основе модели ECOMAG форматы. Для сравнения аналогичные расчеты проводились на основе модели ECOMAG по данным метеорологических станций на основе одних и тех же параметров, полученных при калибровке модели на первом этапе. Основным створом, по которому полученные результаты моделирования сравнивались с данными наблюдений, являлся ключевой для формирования гидрографов половодья у г. Великий Устюг, замыкающий створ ГП р. Сухона – д. Каликино.

Таблица 2. Значения показателей успешности прогноза для метеорологической станции Сыктывкар за период с 01.01.2018 по 10.08.2018**Table 2.** The forecast success rate for the Syktyvkar meteorological station for the period from 01.01.2018 to 10.08.2018

Параметр	Характеристика	Период			Положение
		01.12.17 – 02.28.18	01.03.18 – 31.05.18	01.06.18 – 31.08.18	
Приземная температура воздуха	mean	0.749	-0.08	0.412	В точке
	std	0.985	1.516	0.857	
	min	-1.85	-4.15	-2.37	
	max	4.63	4.94	3.26	
	mae	0.927	1.076	0.719	
	median	0.62	-0.03	0.45	
	rmse	1.233	1.51	0.947	
Температура точки росы	mean	0.194	0.135	0.041	В точке
	std	1.287	1.779	0.882	
	min	-2.4	-5	-1.95	
	max	5.29	3.9	2.12	
	mae	0.884	1.388	0.732	
	median	0	-0.23	0.1	
	rmse	1.294	1.774	0.878	
Атмосферные осадки	FBI	1.16	1.2	1.107	В точке
	EDI	0.727	0.86	0.624	
	TSS	0.475	0.686	0.491	
	mean	-0.189	-0.258	-0.16	
	std	0.572	1.647	2.615	
	min	-2.67	-10.07	-10.71	
	5%	-1.254	-1.933	-3.799	
	95%	0.408	0.814	1.998	
	max	0.92	3.43	13.92	
	mae	0.36	0.601	0.986	
	median	0	0	0	
	rmse	0.599	1.658	2.606	
	ETS	0.276	0.475	0.374	
	В радиусе 15 км	FBI	1.24	1.286	1.25
		EDI	0.716	0.883	0.737
		TSS	0.418	0.678	0.583
		mean	-0.173	-0.223	-0.14
		std	0.569	1.557	2.462
		min	-2.66	-9.19	-10.59
		5%	-1.194	-1.881	-3.79
		95%	0.386	0.746	1.871
		max	0.88	3.15	11.25
		mae	0.358	0.577	0.946
		median	0	0	0
		rmse	0.592	1.565	2.452
		ETS	0.245	0.364	0.322
В радиусе 30 км	FBI	1.42	1.571	1.714	
	EDI	0.856	0.942	0.87	
	TSS	0.37	0.59	0.585	
	mean	0.2	0.44	0.943	
	std	0.753	1.655	3.229	
	min	-2.12	-7.43	-6.89	
	5%	-0.66	-0.434	-0.629	
	95%	1.32	1.85	5.309	
	max	3.31	8.58	18.72	
	mae	0.486	0.754	1.317	
	median	0.11	0.12	0	
	rmse	0.775	1.703	3.347	

Первые результаты моделирования показывают, что в целом на основе данных модели COSMO-Ru модель формирования стока ECOMAG воспроизводит основные особенности гидрографов стока за половодье (рис. 6). Особенно важным является хорошее соответствие смоделированных по данным метеостанций и по данным модели COSMO-Ru гидрографов для выдающихся половодий 2013 и 2016 гг., когда наблюдались наводнения стоково-заторного генезиса. В 2013 г. максимальные расходы по результатам моделирования наблюдаются в тот же день, что и фактический максимум, однако модель завышает максимальные расходы как при моделировании на основе данных COSMO-Ru, так и на основе данных метеостанций примерно на 30 %. Для половодья 2016 г., когда при наводнении стоково-заторного генезиса было затоплено более половины г. Великий Устюг, смоделированная по данным COSMO-Ru величина максимального расхода составила 3380 м³/с и совпала с фактической – 3120 м³/с как по величине (относительная ошибка менее 8 %), так и по времени прохождения.

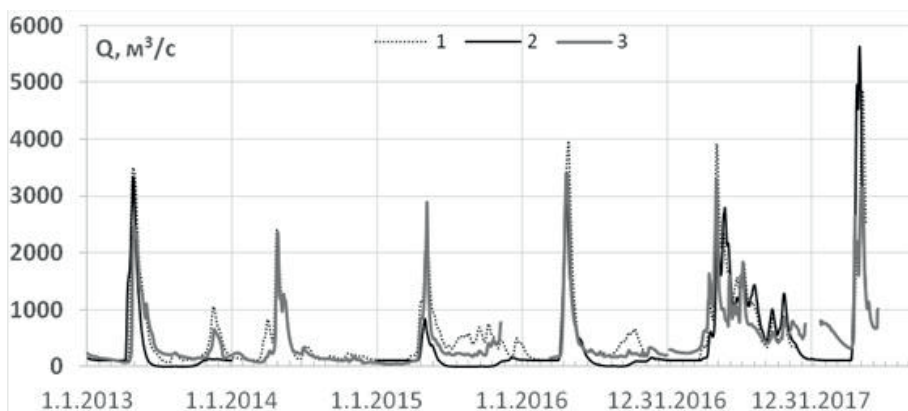


Рис. 6. Сопоставление расходов воды р. Сухона – д. Каликино: смоделированные на основе модели ECOMAG по данным метеостанций (1), по данным модели COSMO-Ru (2), расходы воды по данным ГП р.Сухона – д. Каликино (3).

Fig. 6. Comparison of water discharges of the Sukhona River - Kalikino: modeled on the basis of the ECOMAG model according to meteorological stations data (1), according to the COSMO-Ru model data (2), discharges according to the data of the Kalikino station (3).

При этом стоит отметить, что в отдельные годы моделирование на основе данных COSMO-Ru привело к существенному расхождению с результатами моделирования по данным метеорологических станций и данными наблюдений гидрологического поста. Наибольшие расхождения в максимальных расходах и объемах половодья наблюдаются в 2015 г. и связаны, скорее всего, с существенными неточностями в суммарном

количестве осадков за осенне-зимний период для исследуемого водосбора по данным COSMO-Ru, что обусловило то, что в половодье 2015 г. пик модельного гидрографа в несколько раз ниже фактически наблюдавшегося (850 и 2800 м³/с соответственно), при этом по данным метеостанций модель хорошо воспроизводит данное половодье, и относительная ошибка для максимальных расходов составляет 14 % при совпадении пиков гидрографов по времени.

Наиболее сложными для моделирования являются многомодальные половодья, которые наблюдаются при неоднократном переходе температур воздуха через 0 °С, прерывающем снеготаяние. Подобная ситуация наблюдалась в период половодья 2017 г., в целом результаты моделирования воспроизводят несколько пиков половодья, но они не всегда совпадают по времени и величине, особенно при моделировании по данным COSMO-Ru. Расхождения между модельными гидрографами, полученные на основе расчетов по данным COSMO-Ru и фактическими данными, приводят к более низким значениям оценок качества моделирования этих данных. Критерий Нэша – Сатклифа для ГП р. Сухона – д. Каликино за период с 2013 по 2017 г. (без учета 2014 г., по которому данные COSMO-Ru за период снегонакопления отсутствовали) с использованием данных COSMO-Ru составил 0,44, с использованием фактических синоптических наблюдений – 0,62. Значения NSE в диапазоне от 0,35 до 0,75 для результатов моделирования считаются удовлетворительными, однако за счет короткого ряда данных при моделировании по данным COSMO-Ru на данном этапе сложно говорить об устойчивом результате. Так, в 2015 г. гидрограф половодья описывается неудовлетворительно.

Возможности уточнения результатов моделирования на основе модели формирования стока с использованием региональной модели циркуляции атмосферы COSMO-Ru связаны как с уточнением параметров модели формирования стока, так и с уменьшением величины удельных водосборов с учетом густоты сетки атмосферной модели. Также возможно уточнение величины снегозапасов по данным технологии SnoWE, которая предназначена для расчета характеристик снежного покрова для всей территории Российской Федерации и может применяться как для точечного счета запаса воды на метеорологической станции (точке), так и для счета запаса воды на сетках модели циркуляции атмосферы COSMO-Ru [16].

При переходе в прогностический режим при совместном использовании модели ECOMAG и модели COSMO-Ru наиболее целесообразным представляется проведение моделирования до даты выпуска прогноза по данным метеорологических станций, а на период заблаговременности прогноза (72 ч) – по данным модели COSMO-Ru с введением алгоритма корректировки прогноза с учетом разности фактического и смоделированного гидрографа в дни, предшествующие выпуску прогноза. Тестовые расчеты по такой методике проводились для половодья 2018 г. (рис. 7) и показы-

вают его высокую перспективность, так как модель ECOMAG учитывает основные процессы формирования стока за весь период начиная с осеннего промерзания водосбора, снегонакопления, снеготаяния и т. п. на всей водосборной площади выше исследуемых створов, а модель COSMO-Ru позволяет учитывать краткосрочный прогноз синоптической обстановки.



Рис. 7. Пример тестового прогноза на 3 суток от 23.04.2018 по модели ECOMAG на основе данных модели COSMO (красная линия), фактические расходы по ГП р. Сухона – д. Каликино (серая линия).

Fig. 7. The example of the 3-day test forecast of water discharges, released on April 23, 2018 using the ECOMAG model based on data from the COSMO-Ru model (gray hatching), water discharges simulated on the base of meteorological station data until the day of forecast release (black line), the actual discharges for the Sukhona River – Kalikino (gray line).

Выводы

Эффективным методом для исследования водного режима бассейнов рек, повышения гидрологической безопасности территории и количественной оценки характеристик половодья в условиях недостатка данных гидрометеорологических наблюдений может быть метод совместного применения мезомасштабной модели циркуляции атмосферы COSMO-Ru и модели формирования стока ECOMAG.

Особенно актуально применение данного подхода при прогнозах ежедневных расходов воды для участков заторообразования, так как данные об уровнях воды в период подъема половодья не отражают реальное количество воды в реке и не позволяют выполнять гидрологические прогнозы на основе классических методов.

В работе проведено сравнение наблюдаемых и смоделированных на основе модели COSMO-Ru значений основных метеорологических характеристик в бассейне Северной Двины. Показано, что модель реалистично воспроизводит ход температуры и температуры точки росы, а также сумм осадков за холодный период года.

При моделировании гидрографов ГП р. Сухона – д. Каликино на основе различных метеорологических входов, включая синоптические данные и данные мезомасштабной модели циркуляции атмосферы COSMO-Ru, получены удовлетворительные результаты за период 2013–2018 гг.

В настоящее время для исследуемой территории проводится оценка возможностей оперативного прогнозирования характеристик затопления на основе комплекса моделей гидрометеорологического цикла, включая модель формирования стока для прогнозов расходов воды, гидродинамическую модель для оценки и прогноза уровней воды и зон затопления, в том числе и с подключением ледового блока гидродинамической модели для оценки зон затопления при ледовых заторах [3]. Полученный опыт совместного применения моделей ECOMAG и COSMO-Ru позволит на следующем этапе исследований расширить прогностические возможности системы моделей за счет использования входной информации из региональной метеорологической модели на период заблаговременности прогноза (до 72 ч).

Благодарности

За предоставление данных и консультацию по работе с моделью циркуляции атмосферы COSMO-Ru авторы выражают благодарность Г.С. Ривину и Д.В. Блинову.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-05-60021-Арктика в части адаптации модели формирования стока и № 18-35-00498 мол_а – моделирования за исторический период (раздел 1) и РНФ № 17-11-01254 при тестовых расчетах в режиме краткосрочного прогноза (раздел 3).

Список литературы

1. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Заторные наводнения на р. Сухона в районе г. Великий Устюг // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. Т.2. М.: Из-во МГУ, 2016. 224 с. С. 56-65.

2. Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова Н.Л., Чалов Р.С., Чернов А.В. Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // Эрозия почв и русловые процессы. 2003. Вып. 14. С. 105-131.

3. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 127-137.

4. Антохина Е.Н. Особенности использования метеорологической информации в задачах моделирования стока // Сборник трудов Пятой международной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность». М.: ИВП РАН, 2011. С. 107-109.

5. Антохина Е.Н. Водный режим рек Европейской территории России и его изучение на основе модели формирования стока: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2012.

6. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 422 с.

7. Борщ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 106-127.

8. Блинов Д.В., Ривин Г.С. Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-Ru: Технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142-162.

9. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 297 с.

10. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, Вып. 3. С. 429-437.

11. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. Вып. 5. С. 743-753.

12. Мотовилов Ю.Г., Бальбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В. Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели Ecomag с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. Вып. 1. С. 78-102.

13. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. Вып. 6. С. 58-70.

14. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Кислов А.В., Ольчев А.В., Суркова Г.В., Чубарова Н.Е., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Горлач И.А., Перов В.Л., Платонов В.С., Ревокатова А.П., Чумаков М.М., Копейкин В.В., Кострова У.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Татаринович Е.В., Финкельберг Е.М., Чурюлин Е.В., Захарченко Д.И. Система COSMO-Ru Гидрометцентра России региональных прогнозов погоды и концентрации загрязняющих веществ в атмосфере и ее применение // Сборник трудов XXV рабочей группы «Аэрозоли Сибири», 27-30 ноября 2018 г. Томск: Из-во ИОА СО РАН, 2018.

15. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Завадский А.С., Крыленко И.Н. Оценка опасности гидрологических явлений на региональном и локальном уровнях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. Вып. 3. С. 58-74.

16. Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2018. Вып. 2 (368). С. 120-143.

17. Agafonova S. A., Frolova N. L., Krylenko I. N. et al. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia // Natural Hazards. 2017. Vol. 88, no. S1. P. 171-188.

18. Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E., Zhuk V., Surkova G. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions // IAHS Publ. 368. Wallingford: IAHS Press Ltd., 2015. P. 156-161.

19. Motovilov Yu., Gottschalk K. Engeland, Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Institute Report Series No. 105. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999.

20. Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches. Towards Improved Projections // IAHS Publ. 360. Wallingford: IAHS Press Ltd., 2013. P. 105-112.

21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part: A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. Vol. 10 (3). P. 282–290.

References

1. *Agafonova S.A., Frolova N.L.* Ice jam floods at the Sukhona River Near Veliky Ustyug. *Menyayushchiysya klimat i sotsial'no-ekonomicheskiy potentsial Rossiyskoy Arktiki*, Vol. 2. Moscow, MSU publ., 2016, pp. 56-65. [in Russ.].
2. *Alabyan A.M., Alekseevskiy N.I., Evseeva L.S., ZHuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova N.L., Chalov R.S., Chernov A.V.* Geneticheskiy analiz prichin vesennego zatopeniya doliny Maloy Severnoy Dviny v rayone g. Velikogo Ustyuga. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 2004, vol. 14, pp. 104-130.
3. *Alabyan A.M., Krylenko I.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M., Zelentsov V.A.* Development of Intelligent Information Systems for Operational River-Flood Forecasting. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, № 1, pp. 24-33, doi: 10.1134/S1019331616010056.
4. *Antokhina E.N.* Osobennosti ispol'zovaniya meteorologicheskoy informatsii v zadachakh modelirovaniya stok. Sbornik trudov V mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh i talantlivykh studentov «Vodnye resursy, ekologiya i gidrologicheskaya bezopasnost'». Moscow, IVP RAN, 2011, pp. 107-109. [in Russ.].
5. *Antokhina E.N.* Vodnyy rezhim rek Evropeyskoy territorii Rossii i ego izuchenie na osnove modeli formirovaniya stoka: Avtoref. dis. kand. geogr. nauk, Moscow, MSU publ., 2012. [in Russ.].
6. *Apollova B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.* Kurs gidrologicheskikh prognozov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 422 p. [in Russ.].
7. *Borsch S.V., Burakov D.A., Simonov Y.A.* Technique of operational computation and forecast of daily river inflow into Zea river reservoir. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 106-127. [in Russ.].
8. *Blinov D.V., Rivin G.S.* The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 142-162. [in Russ.].
9. *Vinogradov Yu. B., Vinogradova T. A.* Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii. Moscow, Akademiya, 2010, 297 p. [in Russ.].
10. *Motovilov Y.G.* Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 1. Generalization and averaging algorithms. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 3, pp. 429-437, DOI: 10.1134/S0097807816030118.
11. *Motovilov Y.G.* Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 2. test results. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 743-753, doi: 10.1134/S0097807816050092.
12. *Motovilov Y.G., Balyberdin V.V., Gartsman B.I., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Sokolov O.V.* A Short-term Forecast of the Water Inflow to the Bureya Reservoir on the Basis of ECOMAG Model with the Use of Meteorological Forecasts. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]*, 2017, no. 1, pp. 78-102. [in Russ.].
13. *Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M.* The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400-410, doi: 10.3103/S1068373915060060.
14. *Rivin G. S., Rozinkina I. A., Vil'fand R. M., Kislov A.V., Ol'chev A.V., Surkova G.V., Chubarova N. E., Astakhova E. D., Blinov D. V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Perov V.L., Platonov V.S., Revokatova A.P., Chumakov M.M., Kopeykin V.V., Kostrova U.V., Nikitin M.A., Polyukhov A.A., Tatarinovich E.V., Finkel'berg E.M., Churyulin E.V., Zakharchenko D.I.* Sistema COSMO-Ru Gidromettsentra Rossii regional'nykh prognozov pogody i kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v

atmosfera i ee primenenie. Sbornik trudov XXV rabochey gruppy «Aerozoli Sibiri», 27-30 November 2018, Tomsk, IOA SO RAN, 2018.

15. Frolova N.L., Agafonova S.A., Zavadskiy A.S., Krylenko I.N. Assessment of the Hydrological Phenomena Hazard at Regional and Local Levels. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], 2014, no. 3, pp. 58-74. [in Russ.].

16. Churiulin E.V., Kopeykin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churiulina A.G. Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for different catchment areas are located on the territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 368, no. 2, pp. 120-143.

17. Agafonova S. A., Frolova N. L., Krylenko I. N. et al. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, no. S1, pp. 171-188.

18. Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E., Zhuk V., Surkova G. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions. IAHS Publ. 368. Wallingford, IAHS Press Ltd., 2015, pp. 156-161.

19. Motovilov Yu., Gottschalk K. Engeland, Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Institute Report Series No. 105. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999.

20. Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches. Towards Improved Projections. IAHS Publ. 360. Wallingford. IAHS Press Ltd., 2013. pp. 105-112.

21. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part: A discussion of principles. *J. Hydrology.*, 1970, vol. 10, no. 3, pp. 282-290.

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

Received by the editor 25.12.2018.