

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОДНОГО СТОКА РЕКИ КОЛЫМЫ К СОВРЕМЕННЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

А.А. Лисина¹, А.А. Сазонов², Н.Л. Фролова³, И.Н. Крыленко⁴, Ю.Г. Мотовилов⁵

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши

^{1, 2, 4, 5} Институт водных проблем РАН, лаборатория региональной гидрологии

¹ Асп.; e-mail: lisanastya99@mail.ru

² Ст. препод., канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

³ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁴ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Глав. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: motol49@yandex.ru

Колыма – крупная река в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, бассейн которой подвержен значительным климатическим изменениям. В качестве инструмента исследования особенностей водного режима и изучения его динамики в работе использован информационно-моделирующий комплекс ECOMAG, рассчитывающий ежесуточные расходы воды в заданных створах на основе метеорологических данных с разрешением одни сутки.

В работе анализируется современная динамика водного стока Колымы и стокоформирующих факторов за период 1979–2013 гг., проводится адаптация физико-математической модели для бассейна р. Колымы, а также исследуется чувствительность характеристик водного режима реки к изменениям климатических параметров.

Калибровка и верификация показали хорошую воспроизведимость моделью ECOMAG фактических расходов воды для двух створов на р. Колыме и удовлетворительную воспроизведимость на притоке – Большом Анюе. Использование модели ECOMAG, впервые применяемой для бассейна Колымы, позволило исследовать климатически обусловленные изменения стока. Предварительный статистический анализ показал, что при сравнении средних значений гидрологических характеристик за 2000–2013 гг. со средними за 1979–1999 гг. зафиксирован рост годового стока на 5,1% в гидростворе Колымское в 283 км от устья Колымы (от 99,4 км³ в 1979–1999 гг. до 104,5 км³ в 2000–2013 гг.). Фактические изменения годового стока и его внутригодового распределения хорошо воспроизводятся расчетами и по модели ECOMAG.

Для современного периода характерен рост среднегодовой температуры воздуха на 1,3°C. При этом в марте, апреле, ноябре и декабре температура воздуха по данным метеостанций возросла более чем на 2,5°C. Годовая сумма осадков увеличилась на 8,3%, наиболее резкий рост характерен для сентября и марта.

Для более полного понимания механизмов отклика водного режима р. Колымы на изменения климатических характеристик на базе модели ECOMAG выполнен анализ чувствительности характеристик стока к изменениям температуры воздуха и осадков на основе искусственно смоделированных метеорологических рядов. Показано, что сток воды на 5% чувствительнее к увеличению осадков, чем к росту температуры на 1°C.

Ключевые слова: Колыма, ECOMAG, гидрологический режим, чувствительность стока, климатические изменения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.9

ВВЕДЕНИЕ

Современная динамика гидрологического режима рек Арктической зоны России является откликом на изменения климатических условий данной территории. При этом изменения важнейших факторов формирования стока, температуры воздуха и суммы осадков в полярных областях проявляются наиболее существенно по сравнению с другими регионами планеты [Тепловодообмен..., 2007]. Работы последних лет [Dai et al., 2019] подтверждают

существование эффекта «полярного усиления», при котором более интенсивное потепление происходит вблизи полюсов Земли. Важной отличительной особенностью рек Арктической зоны России является наличие многолетней мерзлоты в пределах их водосборов [Георгиади и др., 2011; Yang, Kane, 2021]. К криолитозоне – области распространения многолетней мерзлоты – относится около четверти суши Северного полушария и более половины территории России. Активная деградация криолитозоны

дополнительно оказывает влияние на гидрологический режим рек, приводя к внутригодовому перераспределению стока [Георгиади и др., 2011; Magritsky et al., 2018]. В последние годы для исследования особенностей гидрологического режима и изучения его динамики все чаще применяются современные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными параметрами.

В качестве объекта исследования в работе выбран бассейн р. Колымы – крупнейший речной бассейн, полностью расположенный в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Физико-математические модели формирования стока на водосборе Колымы использованы в работе [Kuchment, Gelfan, Demidov, 2000], где объектом исследования является бассейн Верхней Колымы (до створа Усть-Среднекан), и в исследовании [Lebedeva et al., 2019], посвященном водосборам ручьев Колымской водно-балансовой станции. В данной работе для бассейна Колымы впервые применен ИМК ECOMAG [Motovilov et al., 1999], широко использующийся для арктических бассейнов в условиях изменяющегося климата [Gottschalk et al., 2001; Krylenko et al., 2015; Gelfan et al., 2014].

Использование гидрологических моделей позволяет оценить влияние климатических изменений на речной сток. Для этого в качестве входной информации задаются искусственные метеорологические ряды. В ряде работ авторы получают метеорологические сценарии с использованием моделей [Krylenko et al., 2015; Гельфанд и др., 2021; Гусев и др., 2014]. При данном подходе точность оценок возможных изменений гидрологического режима лимитируется неопределенностью будущих климатических сценариев.

Другой подход позволяет оценить чувствительность к величинам метеорологических характеристик [Gelfan et al., 2017]. Благодаря линейной трансформации исходных рядов наблюдений становится возможным физически обоснованный анализ чувствительности речного стока к изменению температуры воздуха и количества осадков [Кучмент и др., 1990]. Недостатком подобного подхода является то, что не учитывается внутригодовая неравномерность будущего изменения метеорологических характеристик [Motovilov, Gelfan, 2013]. В данном исследовании на основе метода delta-change transformation [Gelfan et al., 2017] выполнен анализ чувствительности стока Колымы к изменению исходных рядов температуры и осадков.

Таким образом, цель данного исследования заключается в изучении динамики стока Колымы за период с 1979 по 2013 гг. с применением физико-математической модели ECOMAG [Motovilov et al., 2017]. Рассчитаны изменения характеристик гидро-

логического режима Колымы, определена динамика основных стокоформирующих факторов в бассейне реки в течение исследуемого периода и выполнен анализ чувствительности стока к изменению метеорологических характеристик.

Бассейн р. Колымы. Площадь бассейна р. Колымы составляет $647\,000 \text{ км}^2$, около половины его территории занимает Магаданская область, примерно по четверти приходится на Республику Якутия и Чукотский АО, к Хабаровскому краю относится менее 1% бассейна. Колыма образуется при слиянии рек Аян-Юрях и Кулу, которые берут начало на Нерском плоскогорье. Река имеет протяженность 2129 км и впадает в Колымский залив Восточно-Сибирского моря. Среди российских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, Колыма занимает четвертое место по площади водосбора (647 тыс. км^2) и длине (2129 км) после Оби, Енисея и Лены. Тем не менее, из-за своей труднодоступности и малой плотности населения бассейн Колымы остается слабоизученным.

В соответствии с орографическими условиями в бассейне Колымы можно выделить две зоны: к горной местности относятся верхнее и среднее течение, к равнинной – нижнее. Более 80% бассейна принадлежат Яно-Чукотской горной стране: абсолютные отметки высот достигают 2,5 км. Нижнее течение реки приходится на Колымскую низменность, где выделяют таежную и тундровую зоны. Лесистость бассейна достигает 80%, заболоченность – 8%, озера занимают 10%, большинство из которых – термокарстовые озера Колымской низменности [Научно-популярная..., 2023]. Крупнейшими реками бассейна, помимо Колымы, являются Омолон (площадь бассейна $F = 113\,000 \text{ км}^2$), Анюй ($F = 107\,000 \text{ км}^2$), Большой Анюй ($F = 57\,300 \text{ км}^2$), Малый Анюй ($F = 49\,800 \text{ км}^2$), Коркодон ($F = 49\,800 \text{ км}^2$), Ясачная ($F = 35\,900 \text{ км}^2$), Березовка ($F = 28\,400 \text{ км}^2$).

По оценкам [Научно-популярная..., 2023], среднемноголетний годовой сток Колымы составляет $W_0 = 121 \text{ км}^3$, что соответствует среднегодовому расходу воды $Q_0 = 3830 \text{ м}^3/\text{с}$, модулю стока $q_0 = 5,9 \text{ л}/\text{с} \cdot \text{км}^2$, слою стока $y_0 = 187 \text{ мм}$. По классификации рек по водному режиму Б.Д. Зайкова, р. Колыма относится к Восточно-Сибирскому типу; по классификации П.С. Кузина, Колыма относится к типу II1 (реки с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года). Гидрологический режим Колымы является характерным для рек криолитозоны. В гидростворе Колымское половодье обычно наблюдается в конце мая – июне, летний период, прерывающийся дождевыми паводками, длится до октября. По классификации М.И. Львовича, Колыма имеет смешанное питание. Так, по данным [Научно-популярная..., 2023], доля снегового питания составляет

47%, дождевого – 42%, подземного – 11%. Летний подземный сток формируется благодаря дренированию сезонно-талого слоя и водоносного горизонта хорошо проницаемых аллювиальных пород. В зимний период сток обеспечивается, главным образом, за счет прирусловых таликов [Lebedeva et al., 2019]. По данным [Глотов, Глотова, 2010], 80% зимнего стока Колымы приходится на октябрь и ноябрь. Суммарная площадь сквозных таликов не превышает 1–2% площади бассейна [Lebedeva et al., 2019].

Бассейн находится в субарктическом и арктическом климатических поясах. Годовая сумма осадков в нижнем течении на территории Колымской низменности составляет около 250 мм. Количество осадков в верхнем течении более чем в два раза выше – превышает 500 мм. Средняя температура в зимние месяцы опускается ниже -30°C , в наиболее жарком месяце, июле, составляет около 13°C .

Сток р. Колымы зарегулирован Колымским каскадом ГЭС, включающим в себя две ГЭС сезонного регулирования: верхняя ступень – Колымская ГЭС (1894 км от устья) и нижняя ступень – Усть-Среднеканская ГЭС (1678 км от устья). Наполнение Колымского водохранилища началось в 1980-х и в 1988 г. доведено до проектных объемов [Научно-популярная..., 2023]. Строительство Усть-Среднеканской ГЭС продолжается, окончание запланировано на 2024 г. [АО Усть-Среднеканская..., 2023]. Регулирование стока приводит к перераспределению внутригодового стока, в первую очередь к увеличению зимнего меженного стока [Магрицкий, 2008]. По данным [Magritsky et al., 2018], зарегулирование стока Колымским водохранилищем привело к снижению стока половодья на 30–50% на нижерасположенных участках реки. Помимо регулирования стока, влияние на динамику гидрологического режима р. Колымы оказывают климатические изменения [Магрицкий и др., 2019; Алексеевский и др., 2015; Соколов, Ушаков, 2012; Ушаков, 2013]. В настоящее время динамика водного стока Колымы также подвержена климатическим изменениям [Magritsky et al., 2018; Majhi, Yang, 2008]. В створе Среднеколымск при сравнении периодов 1936–1975 и 1976–2013 гг. отмечается существенный рост зимнего стока воды – на 174% [Magritsky et al., 2018]. Годовой слой стока в бассейне увеличился на 8,7 мм. В верхней незарегулированной части бассейна фиксируется увеличение стока рек, что приводит к росту притока воды в Колымское водохранилище [Lebedeva et al., 2019; Majhi, Yang, 2008]; по оценкам [Ушаков, Лебедева, 2016], годовой приток возрос на 14%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки модели бассейна Колымы собрана обширная информация о рельефе, характеристи-

стиках почв и подстилающей поверхности. Источник цифровой модели рельефа с разрешением 1 км и 90 м – проект The Global Land Base Elevation (GLOBE) американского агентства Defense Mapping Agency (DMA). Данные о характере растительности определены по почвенной карте России 1 : 250 000, разработанной коллективом под руководством М.А. Глазовской и представленной в электронном виде Почвенным институтом РАН. Источник информации о подстилающей поверхности – ландшафтная карта стран бывшего СССР 1 : 2 500 000 в электронном виде, разработанная под руководством В.А. Николаева и представленная Почвенным институтом РАН.

В бассейне Колымы на сегодняшний день функционирует 35 гидрологических постов, определение расходов воды на Колыме производится в двух створах: в г. Среднеколымск (641 км от устья) и в пос. Усть-Среднекан – нижнем бьефе Усть-Среднеканской ГЭС (1623 км от устья). Продолжительный ряд ежесуточных расходов воды имеется также для гидроствора Колымское в 283 км от устья на несколько километров ниже впадения крупнейшего притока – р. Омолон. Однако в Колымском с 1998 г. перестали производиться измерения скоростей течения и значения расходов воды стали восстанавливаться по зависимостям $Q = f(H)$.

В качестве входной информации для модели ECOMAG использованы ежесуточные расходы воды в исследуемых створах, взятые из гидрологических ежегодников и с сайта АИС ГМВО [Автоматизированная..., 2023] за период 1979–2013 гг. Так как сток Колымы зарегулирован, в модели использовались данные о сбросах воды Колымской ГЭС как условия на верхней границе участка (рис. 1).

Источником ежесуточных данных о температуре воздуха, количестве осадков и дефиците влажности послужили архивы наблюдений 37 метеостанций в исследуемом регионе (см. рис. 1). Для получения подробной информации о распределении запасов воды в снеге взяты данные проекта FMI GlobSnow. На сайте Европейского космического агентства в рамках проекта GlobSnow для пользователей доступны данные, покрывающие всю территорию Северного полушария [GlobSnow, 2023].

Методика применения модели формирования стока ECOMAG. Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG [Motovilov et al., 1999] представляет собой пространственно-распределенную модель гидрологического цикла и формирования стока, состоящую из гидрологического блока, описывающего происходящие на водосборе процессы: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование

снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутриводочного, грунтового и речного стока, а также геохимического блока. В основе пространственной структуры ECOMAG лежат отдельные ландшафтные единицы («элементарные водосборы»), образующие нерегулярную сетку. Схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне позволяет передать пространственные неоднородности рельефа, почв, ти-

пов землепользования и учесть пространственные особенности гидрометеорологических полей [Мотовилов, Гельфган, 2018].

Расчет по модели производился в створах, для которых имелись продолжительные ряды наблюдений: в двух створах на Колыме – Колымское (283 км от устья) и Среднеколымск (641 км от устья), а также на крупном притоке – р. Большой Анюй в створе станции Константиновская.

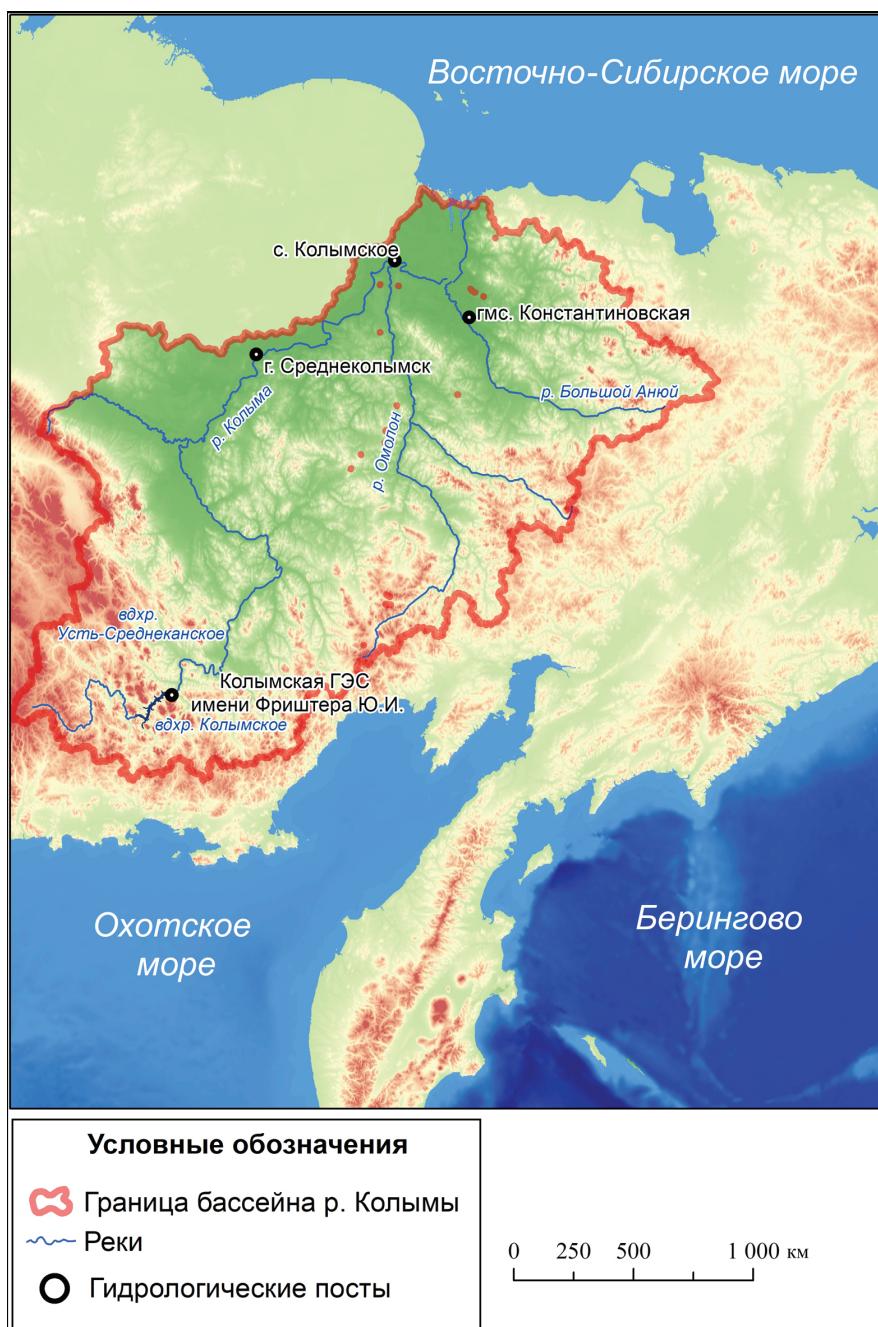


Рис. 1. Бассейн р. Колымы с расположением гидрометрических постов, архивы которых использовались при калибровке и верификации модели формирования стока

Fig. 1. Basin of the Kolyma River with the location of gauging stations, the archives of which were used in calibration and verification of a runoff formation model

ECOMAG содержит набор физически обоснованных параметров, калибровка которых в модели производилась вручную путем расчета критерия Нэша-Сатклифа R^2_{NS} [Nash, Sutcliffe, 1970], часто используемого на практике для оценки точности работы модели и ошибки среднего $BIAS$, рассчитываемых по формулам

$$R^2_{NS} = 1 - \frac{\sum (q_{0i} - q_{si})^2}{\sum (q_{0i} - \bar{q})^2}, \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\bar{Q}_f - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_f} \cdot 100\%, \quad (2)$$

а также с помощью визуального сравнения фактических и смоделированных гидрографов. Значения R^2_{NS} , превышающие принятное в практике пороговое значение 0,75, $|BIAS| < 10\%$, характеризуют качество расчетов по модели как хорошее. При R^2_{NS} , находящемся в диапазоне от 0,5 до 0,75, и $|BIAS|$ от 10 до 15% – как удовлетворительное [Мотовилов, Гельфанд, 2018]. При калибровке параметров модели приведенные выше критерии качества рассчитывались для трех створов и усреднялись с учетом веса, пропорционального площади бассейна для каждого створа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты калибровки модели ECOMAG для бассейна Колымы. По расчетам воспроизведимость моделью ECOMAG фактических расходов воды оказалась хорошей (табл. 1) для обоих створов на р. Колыме (Колымское и г. Среднеколымск), для которых критерий Нэша-Сатклифа за период калибровки (1979–1996 гг.) и верификации (1997–2013 гг.) превышал 0,82, ошибка среднего лежала в пределах 5,1%. Качество расчетов для створа р. Большой Анюй – ГМС Константиновская с меньшей площадью водосбора по принятым градациям оказалось хуже: удовлетворительным по критерию

Нэша-Сатклифа ($0,50 \leq R^2_{NS} < 0,75$), хорошим по величине ошибки среднего ($|BIAS| < 10\%$). На рис. 2 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы для Колымского, расположенного в 283 км от устья Колымы.

Для оценки произошедших изменений анализируемые ряды расходов воды были разделены на две части: 1979–1999 и 2000–2013 гг. Для каждого периода построены типовые гидрографы, ординаты которых получены как средние расходы воды за каждую дату в среднем для двух периодов (рис. 3). Важно отметить, что ИМК ECOMAG хорошо воспроизводит изменение объема годового стока: в гидростворе Колымское по результатам расчетов сток увеличился на 5,7% (от 95,6 до 101,1 км³), а по фактическим рядам – на 5,1% (от 99,4 до 104,5 км³). Для створа г. Среднеколымск рассчитанный годовой сток увеличился на 8,3% (от 68,4 до 74,1 км³), фактический – на 15,9% (от 68,6 до 79,6 км³). Для Большого Анюя снижение стока отмечено как по данным наблюдений (на 9,2% – от 8,8 до 8,0 км³), так и по расчетам модели (на 10,8% – от 8,1 до 7,2 км³).

Отмечена хорошая воспроизводимость ИМК ECOMAG следующих внутригодовых изменений стока (см. рис. 3): смещения волн половодья на более ранние даты, более позднего наступления зимней межени и увеличения стока во второй половине августа – октября. Однако стоит отметить, что расчеты по ECOMAG несколько искажают изменения максимальных расходов воды. В створе р. Колыма – Колымское по фактическим данным средние значения максимальных суточных расходов воды снизились на 0,5% (с 18 300 до 18 200 м³/с), тогда как рассчитанные значения для Колымского увеличились на 8,5% (с 14 900 до 16 100 м³/с). В створе р. Колыма – г. Среднеколымск максимальные фактические расходы воды возросли на 15,7% (с 10 500 до 12 200 м³/с), рассчитанные – на 9,9% (с 10 700 до 11 800 м³/с).

Таблица 1

Значения критериев качества расчета суточного и месячного стока в бассейне р. Колымы для периодов калибровки и верификации

Река – гидропост	Площадь бассейна, тыс. км ²	Расстояние от устья, км	Период калибровки 1979–1996 гг.		Период верификации 1997–2013 гг.			
			Сутки		Месяц	Сутки		Месяц
			R^2_{NS}	$BIAS, \%$	R^2	R^2_{NS}	$BIAS, \%$	R^2
Колыма – гидроствор Колымское	526	283	0,90	1,58	0,94	0,82	1,92	0,85
Колыма – г. Среднеколымск	361	641	0,87	5,09	0,92	0,84	-1,31	0,87
Большой Анюй – ГМС Константиновская	49,6	67	0,51	5,25	0,87	0,51	7,26	0,79

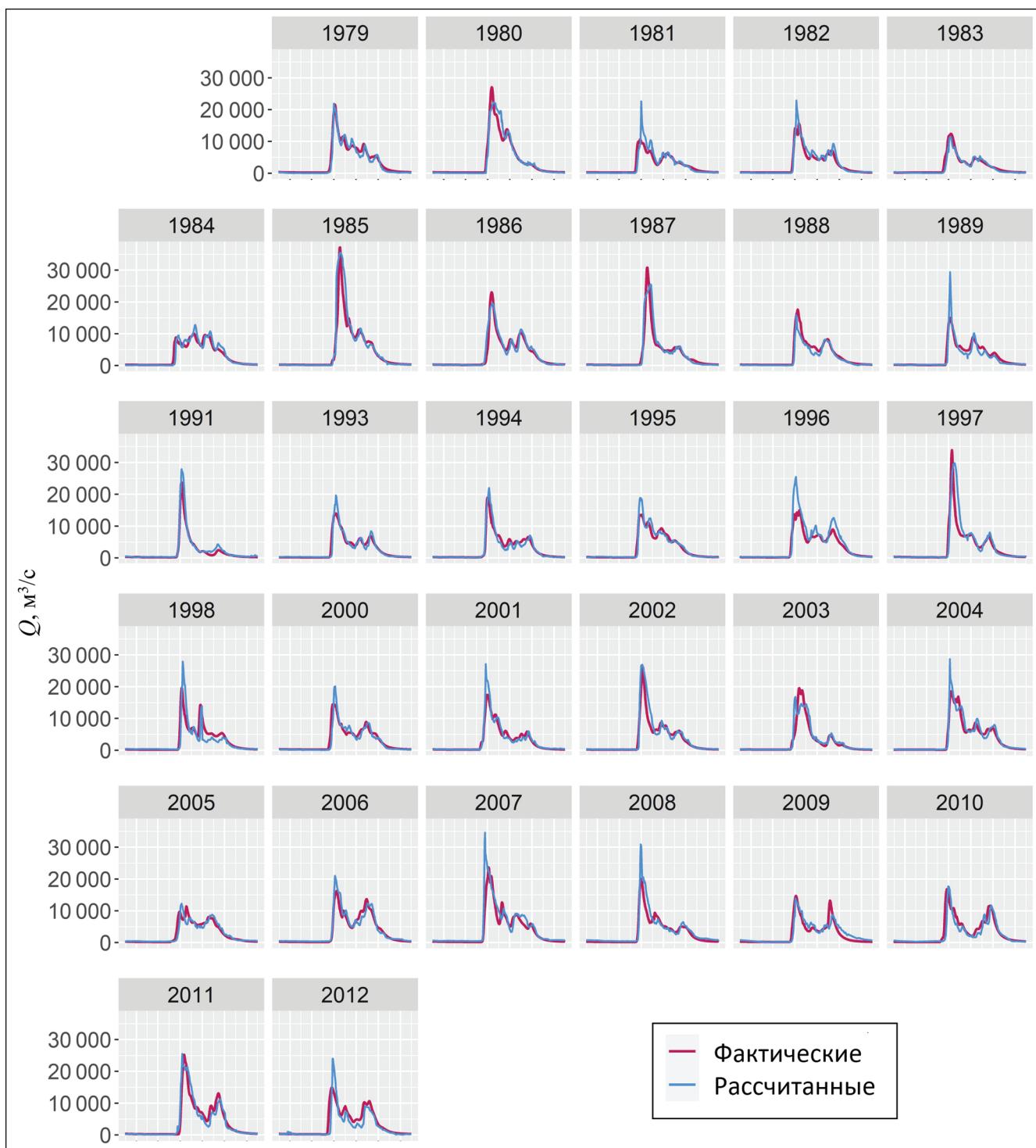


Рис. 2. Фактические и рассчитанные гидрографы в створе р. Колымы – Колымское за 1979–2013 гг.

Fig. 2. Actual and calculated hydrographs at the Kolyma River section – Kolymskoye for 1979–2013

Подобные различия между фактическими и смо-
делированными данными в гидростворе Колымское
для периода верификации связаны, вероятно, с тем,
что с 1998 г. перестали производиться измерения
скоростей течения в Колымском, и значения расхо-
дов воды стали восстанавливаться по зависимостям
 $Q = f(H)$. Качество получаемых данных с сети Рос-
гидромета ухудшилось.

Динамика метеорологических характеристик в бассейне р. Колымы в 1979–2013 гг. Рас-
четы стока с использованием модели ECOMAG
выполнены для 1979–2013 гг. Ниже на основе имеющихся массивов метеорологических данных
за этот период рассматривается динамика основных факторов формирования стока в бассейне р. Колымы.

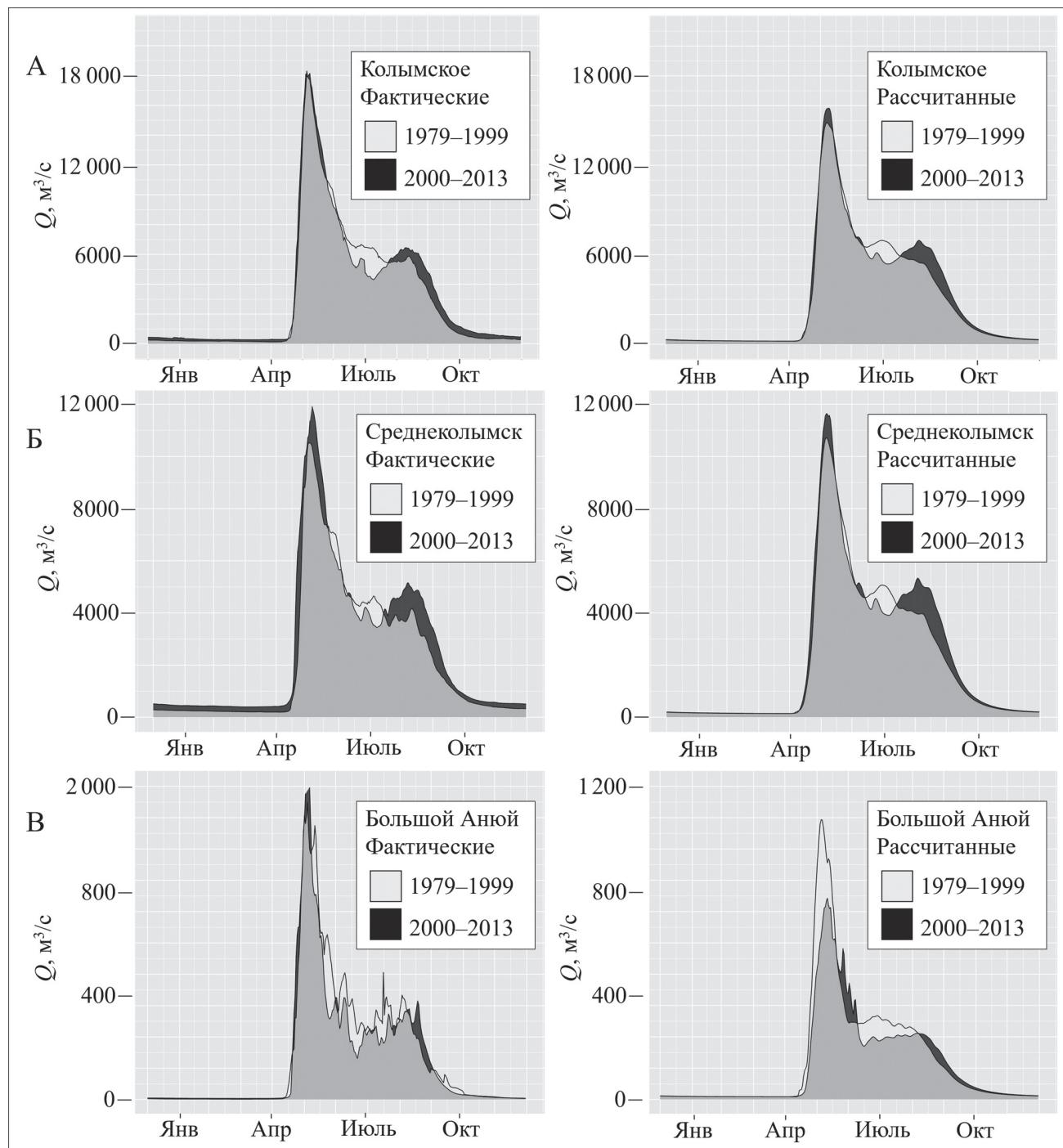


Рис. 3. Фактические и рассчитанные типовые гидрографы за периоды 1979–1999 и 2000–2013 гг. для р. Колымы – гидроствор Колымское (А), для створа р. Колымы – г. Среднеколымск (Б), для створа р. Большой Анюй – ГМС Константиновская (В)

Fig. 3. Actual and calculated typical hydrographs for the periods 1979–1999 and 2000–2013 for the Kolyma River – Kolymskoe hydraulic station (A), for the Kolyma River section – Srednekolymsk (B), for the Bolshoi Anyui River section – HMS Konstantinovskaya (B)

Получена количественная оценка изменений температуры воздуха и осадков, произошедших в бассейне Колымы. С этой целью временной ряд метеорологических характеристик за 1979–2013 гг. был поделен на две части, сравнивались средние по всему бассейну величины

для двух периодов: 1979–1999 и 2000–2013 гг. Произошедшие в бассейне Колымы изменения среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков в среднем в 2000–2013 гг. относительно среднего в 1979–1999 гг. отражены на рис. 4.

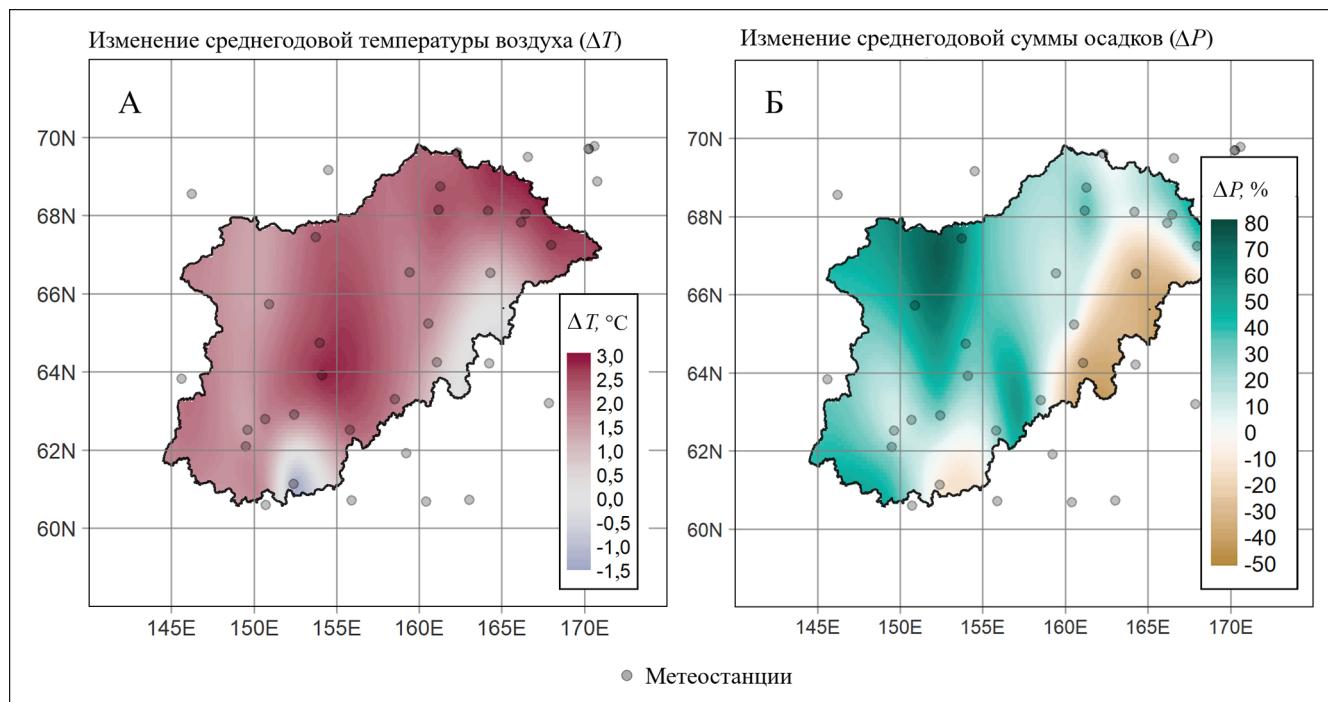


Рис. 4. Изменение среднегодовой температуры воздуха (А) и суммы осадков (Б) в бассейне р. Колымы в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.

Fig. 4. Changes in the average annual air temperature (A) and the amount of precipitation (B) in the Kolyma River basin in 2000–2013 relative to 1979–1999

Рассчитанные средние значения метеорологических характеристик для каждого месяца и за год, а также их изменение, приведены в табл. 2. В бассейне Колымы с 1979 г. отмечена тенденция роста среднегодовых температур воздуха и годовой суммы осадков. Средняя температура в 2000–2013 гг. ($-10,2^{\circ}\text{C}$) выросла на $1,3^{\circ}\text{C}$ относительно 1979–1999 гг. ($-11,5^{\circ}\text{C}$), годовая сумма осадков – на 8,3% (с 350 до 379 мм). Наиболее активный рост температуры наблюдается в ноябре (на $3,2^{\circ}\text{C}$), марте (на $2,9^{\circ}\text{C}$), декабре (на $2,6^{\circ}\text{C}$) и апреле (на $2,3^{\circ}\text{C}$). При сравнении периодов 1979–1999 и 2000–2013 гг. можно отметить увеличение весенних температур на $2,3^{\circ}\text{C}$, осенних – на $1,8^{\circ}\text{C}$, летних – на $1,0^{\circ}\text{C}$, зимних – на $2,0^{\circ}\text{C}$. Количество осадков увеличилось более чем на 20% в августе и сентябре, а также в марте и декабре. При этом в феврале и ноябре зафиксировано снижение суммы осадков. В июне, когда на Колыме проходит пик половодья, количество осадков возросло на 16%, за летне-осенний период (с августа по октябрь) – увеличилось на 19%.

Помимо температуры воздуха и количества осадков важным стокоформирующим фактором является высота снежного покрова. Использование данных пассивной микроволновой радиометрии (международный проект GlobSnow), а также метеорологического реанализа ERA5 позволило

оценить точность результатов расчета распределения снежного покрова внутри модели ECOMAG. Соответствие межгодового хода средней для бассейна Колымы величины запасов воды в снежном покрове бассейна по различным источникам данных оказалось хорошим (рис. 5), что дает возможность использовать эту информацию для решения различных гидрологических задач. В феврале коэффициент корреляции между величинами запаса воды в снеге по ECOMAG и по ERA5 составил 0,78 в среднем для 2000–2010 гг. В апреле соответствие между моделью и реанализом лучше: коэффициент корреляции 0,86. При этом заметно систематическое превышение данных ERA5 и ECOMAG над GlobSnow. Так, коэффициент корреляции между величинами запаса воды в снеге по реанализу ERA5 и микроволновой съемке GlobSnow составил 0,68 для февраля и 0,80 для апреля (см. рис. 5). На основе данных метеорологического реанализа ERA5 рассчитаны величины запаса воды в снежном покрове в среднем на всем бассейне Колымы для каждого месяца в 1979–1999 и 2000–2013 гг. (табл. 3). Увеличение запасов воды в снеге в зимние месяцы связано с существенным увеличением количества осадков в декабре – на 29,8% (см. табл. 2). При этом в мае и октябре запасы воды в снеге снизились, что связано с ростом температуры в эти месяцы.

Таблица 2

**Изменение средней годовой температуры воздуха и суммы осадков в бассейне р. Колымы
в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.**

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<i>Средняя температура воздуха, °C</i>													
1979–1999	-34,2	-31,3	-25,3	-13,3	0,8	11,0	13,4	9,8	2,7	-11,1	-26,3	-34,1	-11,5
2000–2013	-34,6	-32,9	-22,4	-11,0	2,6	11,3	14,8	11,0	3,5	-9,7	-23,1	-31,5	-10,2
Изменение, °C	-0,4	-1,6	2,9	2,3	1,8	0,3	1,4	1,2	0,8	1,4	3,2	2,6	1,3
<i>Средняя сумма осадков, мм</i>													
1979–1999	18,3	19,8	9,9	11,6	17,9	33,3	61,5	43,3	26,6	25,5	37,7	13,8	321
2000–2013	18,2	16,8	13,3	12,7	19,3	39,8	62,9	55,2	35,6	27,0	31,5	17,6	350
Изменение, %	-0,3	-17,9	25,6	8,7	7,3	16,3	2,2	21,6	25,3	5,6	-19,7	21,6	8,3

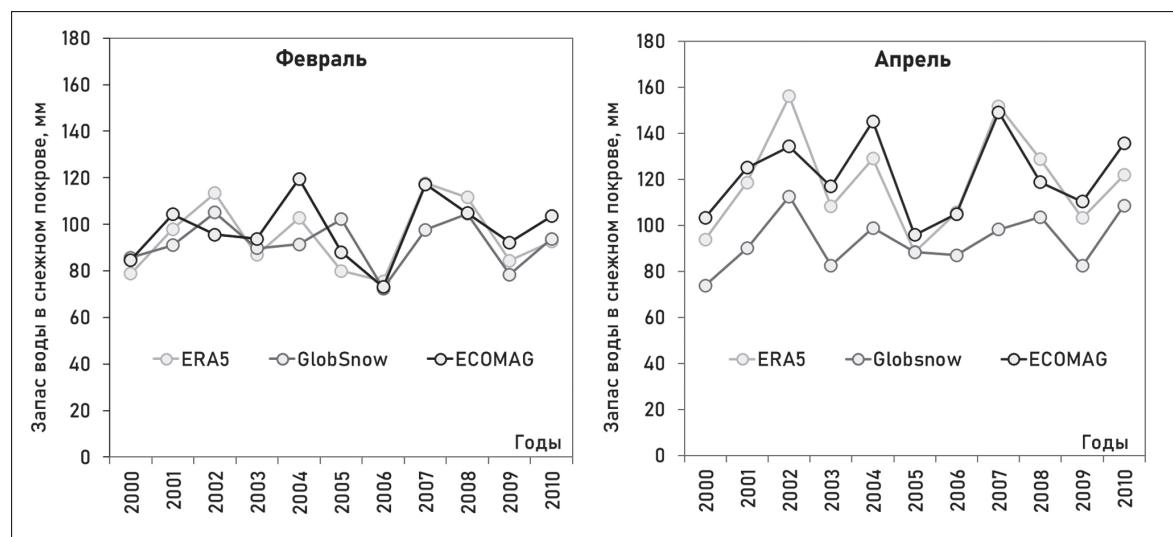


Рис. 5. Запасы воды в снежном покрове в среднем для бассейна р. Колымы по данным реанализа ERA5, по спутниковым данным GlobSnow и по результатам расчета в модели ECOMAG для февраля и апреля за 2000–2010 гг.

Fig. 5. Average water reserves in snow cover for the Kolyma River basin according to the ERA5 reanalysis data, the GlobSnow satellite data and the results of the ECOMAG model calculations for 2000–2010 (February and April)

Таблица 3

Изменение средних запасов воды в снежном покрове в бассейне р. Колымы по данным реанализа ERA5 в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.

Месяц	Запасы воды в снежном покрове, мм		Изменение запасов воды в снежном покрове	
	1979–1999 гг.	2000–2013 гг.	мм	%
Октябрь	30	28	-2,62	-8,6
Ноябрь	58	58	-0,16	-0,3
Декабрь	76	82	5,49	7,2
Январь	93	97	3,38	3,6
Февраль	110	111	0,89	0,8
Март	124	125	1,13	0,9
Апрель	133	134	1,83	1,4
Май	97	89	-7,98	-8,2

Наиболее легко идентифицируемым показателем темпов деградации криолитозоны является глубина сезонно-тального слоя – максимальная за год глубина оттаивания многолетнемерзлых грунтов. Основным источником данных является программа CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring), в рамках которой, начиная с 1990 г., проводятся годы измерения глубины сезонно-тального слоя [CALM..., 2023]. Однако из-за нерегулярной сети мониторинга становится невозможным рассчитать с высокой точностью скорость увеличения глубины сезонно-тального слоя для всего бассейна Колымы. При сравнении средних глубин сезонного оттаивания в бассейне Колымы для периода 1990–1999 и 2000–2013 гг. следует отметить увеличение глубин для всей территории бассейна. Максимальное увеличение глубин наблюдается в нижней части бассейна ближе к устью Колымы, где глубины сезонного оттаивания возросли более чем на 50% в 2000–2013 гг. относительно 1990–1999 гг., т. е. прирост сезонно талого слоя превысил 2 см/год.

Таблица 4

Аномалии моделируемых значений годового стока (%) при изменении годовых температуры воздуха (ΔT , °C) и суммы осадков (ΔP , %) в створе р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔT , °C ΔP , %	-1	0	+1	+2	+3
-10	-10	-14,7	-19	-24	-29
-5	-2,1	-7,1	-12	-17	-21
0	5,9	100,6 км³	-4,0	-9,0	-14
5	14	9,1	4,0	-1,1	-6,2
10	23	17	12	7,1	2,8
15	31	26	21	15	10
20	40	34	29	24	18

Примечание. Жирным шрифтом указана норма годового стока.

Анализ чувствительности стока р. Колымы к климатическим изменениям. Хорошая воспроизводимость фактических данных позволила использовать ECOMAG для анализа чувствительности годового и сезонного стока воды р. Колымы к климатическим изменениям. Искусственные ряды ежесуточных значений температуры воздуха и осадков получены путем трансформации исходных данных за 1984–2013 гг.: все значения в 30-летнем ряду температур воздуха изменились на заданную величину ΔT , в ряду осадков – на заданный множитель ΔP . Поправки рассматривались в диапазо-

не от -1 до +4°C для температуры и от 0,9 до 1,2 для осадков (т. е. варианты от снижения суммы осадков на 10% до увеличения на 20%). По результатам моделирования ежесуточных расходов воды для каждого тридцатилетнего периода для различных заданных ΔT и ΔP были рассчитаны типовые гидрографы стока, ординаты которых получены как средние расходы воды за каждую дату для выделенного периода. Дальнейший анализ проводился для типовых гидрографов (рис. 6, табл. 4–6).

Среднемноголетний годовой сток воды, полученный по модели для 1984–2013 гг., в створе р. Колыма – Колымское составляет 100,6 км³/год. При неизменном количестве осадков либо температуре воздуха заметна тенденция увеличения стока с ростом осадков и снижения стока при увеличении температуры вследствие повышения потерь на испарение. Установлено, что в случае, когда количество осадков возрастает на 5%, увеличивая приходную составляющую водного баланса, а при этом температура воздуха растет на 1°C, повышая потери на испарение, то водный сток увеличивается на 4%. Таким образом, моделируемые гидрографы более чувствительны к повышению количества осадков на 5%, чем к росту температуры на 1°C (см. табл. 4).

Как было упомянуто выше, годовой сток в створе р. Колыма – Колымское в 2000–2013 гг. по данным наблюдений увеличился на 5,7% относительно 1979–1999 гг. Температура воздуха за этот же период возросла на 1,1°C, годовая сумма осадков – на 7,7%. Дополнительно к рассмотренным выше сочетаниям ΔT и ΔP выполнены расчеты по ИМК ECOMAG, когда все значения в ряду температур увеличены на $\Delta T = 1,1^\circ\text{C}$, а ко всем значениям в ряду осадков добавлен множитель $\Delta P = 1,077$. При этом смоделированный годовой сток увеличился на 6,8% относительно расчета по исходным метеорологическим рядам без поправок ΔT и ΔP . Данный результат хорошо соотносится с изменением стока на 5,7%, которое было получено по фактическим расходам воды при сравнении 2000–2013 гг. и 1979–1999 гг. Это подчеркивает определяющее влияние на формирование стока температуры воздуха и осадков. При этом прочие стокоформирующие факторы могут оказывать более существенный вклад на изменение стока, чем его увеличение на 1,1% (6,8%–5,7%), так как эти факторы могут иметь разнонаправленное влияние на величину стока, в результате компенсируя друг друга.

Сток воды в зимнюю межень, в отличие от годового, при неизменных осадках будет расти с увеличением температуры, что связано не только с практическим полным отсутствием потерь на испарение в зимнюю межень, но и с замедлением процесса истощения зимнего стока при более высокой температуре (табл. 5).

Таблица 5

Аномалии моделируемых значений среднего расхода воды зимней межени (%) при изменении годовых температуры воздуха (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) и суммы осадков (ΔP , %) для створа р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔT , $^{\circ}\text{C}$ ΔP , %	-1	0	+1	+2	+3
-10	-0,6	-0,6	-1,4	-3,5	-5,3
-5	1,5	-0,9	-1,6	-3,6	-5,1
0	2,1	6,98 км³	-1,9	-3,8	-4,8
5	1,9	0,0	-2,4	-3,0	-6,1
10	2,3	0,4	-2,0	-3,7	-6,6
15	1,3	0,0	-1,7	-3,9	-6,1
20	1,2	-1,3	-2,8	-5,0	-5,8

Примечание. Жирным шрифтом указаны норма зимнего меженного стока.

Максимальные расходы воды снижаются при росте температуры и при уменьшении числа осадков. При этом максимальные расходы воды увеличиваются быстрее, чем объемы стока в половодье, а снижаются медленнее. Уменьшение количества осадков на 5% и снижение температуры на 1°C приводит к незначительному увеличению максимальных расходов воды, в отличие от годового стока, который в таком случае снижается (табл. 6).

Полученные результаты позволяют сравнить чувствительность годового стока р. Колымы с другими крупнейшими реками – Леной [Motovilov, Gelfan, 2013] и Северной Двиной [Krylenko et al., 2015]. Сток Северной Двины, сходной по водности с Колымой, сильнее подвержен изменениям климатических параметров. Относительное изменение стока Лены в сравнении с Колымой более существенно при снижении стока и менее существенно при его росте. Так, рост температуры на 1°C приведет к снижению годового стока на 2, 5, 7% для Колымы, Лены и Северной Двины соответственно, увеличение суммы осадков на 10% – к росту годового стока на 19, 16, 21% для Колымы, Лены и Северной Двины соответственно.

ВЫВОДЫ

Анализ архивов наблюдений на 37 метеостанциях в исследуемом регионе показал, что в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг. среднегодовая температура воздуха увеличилась на $1,3^{\circ}\text{C}$, годовая сумма осадков – на 8,3%. При этом наиболее резкие изменения произошли в марте и декабре, когда температура воздуха увеличилась на 2,9 и $2,6^{\circ}\text{C}$, а количество осадков увеличилось на 25,6 и 21,6% соответственно.

Таблица 6

Аномалии моделируемых значений максимальных расходов воды (%) при изменении годовых температур воздуха (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) и суммы осадков (ΔP , %) для створа р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔT , $^{\circ}\text{C}$ ΔP , %	-1	0	+1	+2	+3
-10	-6	-16	-22	-28	-34
-5	2	-8	-15	-20	-27
0	11	15 800 м³/с	-7	-13	-20
5	22	10	2	-5	-12
10	32	20	10	4	-3
15	43	30	19	13	5
20	55	40	29	22	14

Примечание. Жирным шрифтом указана норма максимальных расходов воды.

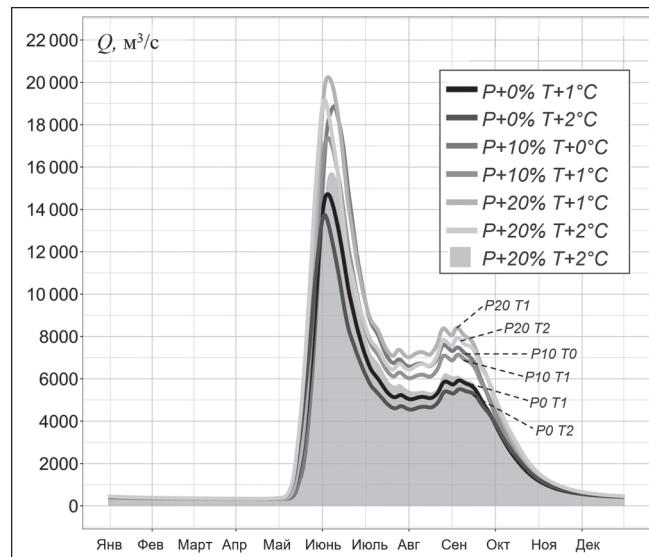


Рис. 6. Типовые смоделированные гидрографы стока для 30-летних периодов, полученные при изменениях годовой температуры воздуха и суммы осадков для водосбора р. Колыма – Колымское

Fig. 6. Typical runoff hydrographs for 30-year periods, modeled with regard to changes in annual air temperature and precipitation for the Kolyma River catchment – Kolymskoye

В результате сравнения среднемесячных запасов воды в снежном покрове по архивам ERA5 и GlobSnow с рассчитанными величинами по модели ECOMAG установлена хорошая сходимость данных этих баз и расчетов модели ECOMAG. Зафиксировано снижение запасов воды в снеге в октябре и мае и увеличение в зимние месяцы.

Для всего бассейна р. Колымы впервые разработана физико-математическая модель формирования стока ECOMAG с пространственно-распределенными параметрами. Расчеты по модели с хорошей точностью воспроизводят фактические гидрографы стока в створах р. Колыма – г. Среднеколымск и р. Колыма – Колымское, и с удовлетворительной точностью гидрографы стока в створе р. Большой Анюй – ГМС Константиновская. При этом качество расчетов хуже для створа с меньшей площадью – р. Большой Анюй – ГМС Константиновская, а также для максимальных расходов воды в створе р. Колыма – Колымское, когда расходы воды восстанавливались по зависимости $Q = f(H)$.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 24-17-00084). Часть данных собрана и обработана в рамках темы № FMWZ-2022-0001 государственного задания ИВП РАН, оценка чувствительности стока – в рамках темы FMWZ-2022-0003 государственного задания ИВП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
- Гельфанд А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
- Георгиади А.Г., Коронкович Н.И., Милюкова И.П. и др. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1: Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П. Изменения ресурсов пресных природных вод в горных районах криолитозоны при глобальном потеплении климата (на примере северо-востока России) // Водные ресурсы. 2011. № 1. С. 1408–1412.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса рек Оленек и Индигирка в связи с возможным изменением климата в районе Республики Саха (Якутия) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 621–636. DOI: 10.7868/S0321059614030092.
- Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 144 с.
- Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
- Магрицкий Д.В., Повалишникова Е.С., Фролова Н.Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфанд А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Российская академия наук, 2018. 296 с.
- Расчеты по модели воспроизводят климатические изменения для периода 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.: рост среднегодовых расходов воды на р. Колыме на 4,0%, увеличение стока в конце лета – начале осени, снижение продолжительности зимней межени.
- Хорошая воспроизводимость моделью фактических данных позволила использовать ее для анализа чувствительности годового стока р. Колымы к возможным изменениям температуры воздуха и осадков. Показано увеличение стока воды при снижении температуры воздуха и при росте суммы осадков. При этом сток воды чувствительнее к повышению осадков на 5%, чем к росту температуры на 1°C, так как в этом случае сток увеличивается на 4,0% за год.
- Соколов О.В., Ушаков М.В. Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова. 2012. № 566. С. 289–297.
- Тепловообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы / отв. ред. А.Г. Георгиади, А.Н. Золотокрылин. М.: Триада, 2007. 576 с.
- Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 2. С. 20–24.
- Ушаков М.В., Лебедева Л.С. Климатические изменения режима формирования притока воды в Колымское водохранилище // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. 2016. Т. 25. № 246. С. 120–127.
- Dai A., Luo D., Song M., Liu J. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂, *Nature Communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 121, DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.
- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu. et al. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Clim. Change*, 2017, vol. 141, p. 499–515, DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
- Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I. et al. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions, *Hydrological Sciences Journal*, 2014, vol. 60, no. 7–8, p. 1266–1285, DOI: 10.1080/02626667.2014.935780.
- Gottschalk L., Beldring S., Engeland K. et al. Regional/macroscale hydrological modelling: A Scandinavian experience, *Hydrological Sciences Journal*, 2001, no. 46, p. 963–982, DOI: 10.1080/02626660109492889.
- Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E. et al. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2015, vol. 368, p. 156–161, DOI: 10.5194/p-iahs-368-156-2015.

- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions, *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 240, no. 1–2, p. 1–22, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00318-8.
- Lebedeva L., Makarieva O., Vinogradova T. Analysis of spatial variability of river streamflow at the catchment area of the Kolyma reservoir, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, no. 1, p. 012022, DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012022.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Majhi I., Yang D. Streamflow characteristics and changes in Kolyma basin in Siberia, *Journal of Hydrometeorology*, 2008, vol. 9, no. 2, p. 267–279, DOI: 10.1175/2007jhm845.1.
- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agric. For. Meteorol.*, 1999, no. 98–99, p. 257–277, DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00102-1.
- Motovilov Y., Gelfan A. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2013, vol. 360, p. 105–112.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, no. 3, p. 282–290.
- Yang D., Kane D.L. Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Cham., Springer, 2021, 914 p., DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.

Электронные ресурсы

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.sknivh.ru> (дата обращения 01.07.2023).
- АО Усть-Среднеканская ГЭС им. А.Ф. Дьякова: URL: <http://www.usges.rushydro.ru/> (дата обращения 01.07.2023).
- Научно-популярная энциклопедия «Вода России». URL: https://water-rf.ru/Водные_объекты/434/Колыма (дата обращения 01.07.2023).
- CALM Program Description, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/about/program.html> (дата обращения 01.07.2023).
- GlobSnow, Finnish meteorological institute, ESA, URL: <http://www.globalsnow.info/> (дата обращения 01.07.2023).

Поступила в редакцию 03.09.2023

После доработки 15.12.2023

Принята к публикации 14.02.2024

SENSITIVITY OF THE KOLYMA RIVER RUNOFF TO MODERN CLIMATE CHANGE

A.A. Lisina¹, A.A. Sazonov², N.L. Frolova³, I.N. Krylenko⁴, Yu.G. Motovilov⁵

^{1–4} Lomonosov Moscow State University, Department of Land Hydrology
^{1, 2, 4, 5} Water Problem Institute of the Russian Academy of Science, Laboratory of Regional Hydrology

¹ Postgraduate student; e-mail: lisanastya99@mail.ru

² Senior Lecturer; Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

³ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁴ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: motol49@yandex.ru

The Kolyma River is a large river in the continuous permafrost zone. Its basin is subject to significant climatic changes. An information-modeling complex ECOMAG is employed for the study of water regime features and dynamics. ECOMAG calculates daily water flow rates at specified points based on meteorological data with a one-day resolution.

This study analyzes the actual dynamics of water runoff and runoff-forming factors during the period from 1979 to 2013. A physical-mathematical model is adapted for the Kolyma River basin. Furthermore, the study examines the sensitivity of water regime characteristics to changing climate parameters.

Calibration and verification demonstrated the ECOMAG's ability to accurately reproduce observed water discharges for two points on the Kolyma River and its tributary, the Bolshoy Anyui River. The ECOMAG model was for the first time employed for the Kolyma River basin, thus allowing the investigation of climate-related runoff changes. The preliminary statistical analysis revealed that if the average hydrological characteristics in the Kolyma River basin from 2000 to 2013 are compared with those from 1979 to 1999 a 5,1% rise of annual river runoff is evident for the Kolymskoye river section 283 km upstream the Kolyma River mouth (from 99,4 km³ in 1979–1999 up to 104,5 km³ in 2000–2013). The ECOMAG model also effectively captures changes in the annual water runoff and its intra-annual distribution.

A rise in the mean annual air temperature by 1,3°C is characteristic of the modern time period. According to weather station data, the air temperature in March, April, November, and December increased by more

than 2,5°C. The total annual precipitation increased by 8,3%, with September and March experiencing the most pronounced growth.

To gain a more comprehensive understanding of the mechanisms governing the Kolyma River's response to climate changes, the sensitivity of water runoff characteristics to air temperature and precipitation changes was analyzed using the ECOMAG model to generate artificial meteorological data series. The study demonstrates that water discharge is more sensitive to a 5% increase in precipitation than to a 1°C rise in air temperature.

Keywords: the Kolyma River, ECOMAG, hydrological regime, runoff sensitivity, climate change

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00084). The data were partly collected and processed under the state task theme FMWZ-2022-0001 of the WPI RAS, the assessment of runoff sensitivity was carried out under the state task theme FMWZ-2022-0003 of the WPI RAS.

REFERENCES

- Alekseevsky N.I., Magritskiy D.V., Mikhailov V.N. Antropogennye i estestvennye izmeneniya gidrologicheskikh ogranichenij dlya prirodopol'zovaniya v del'tah rek Rossiskoj Arktiki [Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the deltas of the rivers of the Russian Arctic], *Vodnoe hozyajstvo Rossii*, 2015, no. 1, p. 14–31. (In Russian)
- Dai A., Luo D., Song M., Liu J. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂, *Nature Communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 121, DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.
- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu., Arheimer B., Kallugina A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Clim. Change*, 2017, V. 141, p. 499–515, DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
- Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharyova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions, *Hydrological Sciences Journal*, 2014, vol. 60, no. 7–8, p. 1266–1285, DOI: 10.1080/02626667.2014.935780.
- Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Vliyanie izmeneniya klimata na godovoj i maksimal'nyj stok rek Rossii: ocenka i prognoz [The impact of climate change on the annual and maximum flow of Russian rivers: assessment and forecast], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 36–79, DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P. et al. Scenarnaya ocenka veroyatnykh izmenenij rechnogo stoka v bassejnakh krupnejshikh rek Rossii [Scenarios of possible river runoff changes in the basins of the largest rivers of Russia], chast' 1, Bassejn reki Leny, Moscow, Maks Press, 2011. 179 p. (In Russian)
- Glotov V.E., Glotova L.P. Izmeneniya resursov presnykh prirodnnykh vod v gornykh rajonakh kriolitozony pri global'nom poteplenii klimata (na primere severo-vostočka Rossii) [Changes of fresh natural water resources in mountain areas of cryolithozone at global climate warming (on the example of North-East of Russia)], *Vodnye Resursy*, 2011, no. 1, p. 1408–1412. (In Russian)
- Gottschalk L., Beldring S., Engeland K. et al. Regional/macroscale hydrological modelling: A Scandinavian experience, *Hydrological Sciences Journal*, 2001, no. 46, p. 963–982, DOI: 10.1080/02626660109492889.
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Jogan L.Ya., Aizel G.V. Scenario prediction of changes in water balance components of the Olenek and Indigirka rivers in the context of possible climate change in the region of the Republic of Sakha, *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 6, p. 748–762, DOI: 10.7868/S0321059614030092.
- Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E. et al. Physically-based distributed modelling of River runoff under changing climate conditions, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2015, no. 368, p. 156–161, DOI: 10.5194/iahs-368-156-2015.
- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions, *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 240, no. 1–2, p. 1–22, DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00318-8.
- Kuchment L.S., Motovilov Yu.G., Nazarov N.A. *Chuvstvitel'nost' gidrologicheskikh system* [Sensitivity of hydrological systems], Moscow, Nauka Publ., 1990, 144 p. (In Russian)
- Lebedeva L., Makarieva O., Vinogradova T. Analysis of spatial variability of river streamflow at the catchment area of the Kolyma reservoir, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, no. 1, p. 012022, DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012022.
- Magritskiy D.V., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. Istoriya izuchenija stoka vody i vodnogo rezhima rek Arkticheskoy zony Rossii v XX v. i nachale XXI v. [History of the study of water flow and water regime of the rivers of the Arctic zone of Russia in the XX century and the beginning of the XXI century], *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 3, p. 61–96, DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939. (In Russian)
- Magritskiy D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean, *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, p. 3–16.
- Magritskiy D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Majhi I., Yang D. Streamflow characteristics and changes in Kolyma basin in Siberia, *Journal of Hydrometeorology*, 2008, vol. 9, no. 2, p. 267–279, DOI: 10.1175/2007jh845.1.
- Motovilov Y., Gelfan A. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2013, no. 360, p. 105–112.

- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agric. For. Meteorol.*, 1999, no. 98–99, p. 257–277, DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00102-1.
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh bassejnov* [Models of flow formation in the problems of hydrology of river basins], Moscow, Russian Academy of Sciences, 2018, 296 p. (In Russian)
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, no. 3, p. 282–290.
- Sokolov O.V., Ushakov M.V. [Consideration of climatic changes in forecasting the inflow of water to the Kolyma reservoir in May], *Trudy Glavnogo geofizicheskogo observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov], 2012, no. 566, p. 289–297. (In Russian)
- Teplovodoobmen v merzlotnykh landshaftakh Vostochnoj Sibiri i ego faktory* [Heat and water exchange in permafrost landscapes of the Eastern Siberia and its factors], A.G. Georgiadi, A.N. Zolotokrylin, Moscow, Triada Publ., 2007, 576 p. (In Russian)
- Ushakov M.V. Vliyanie Kolymskoj GES i klimaticeskikh izmenenij na gidrologicheskij rezhim r. Kolyma [The influence of the Kolyma HPP and climate changes on the hydrological regime of the Kolyma River], *Vestnik SVNC DVO RAN*, 2013, no. 2, p. 20–24. (In Russian)
- Ushakov M.V., Lebedeva L.S. Klimaticheskie izmeneniya rezhima formirovaniya pritoka vody v Kolymskoe vodokhranilishche [Climatic changes in the regime of formation of water inflow into the Kolyma reservoir], *Nauchnye vedomosti BelGU, Ser. Estestvennye nauki*, 2016, vol. 25, no. 246, p. 120–27. (In Russian)
- Yang D., Kane D.L. *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*, Cham., Springer, 2021, 914 p., DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.

Web sources

- AO Ust'-Srednekanskaya GES im. A.F. D'yakova [JSC Ust'-Srednekanskaya HPP named after A.F. Dyakov], URL: <http://www.usges.rushydro.ru> (access date 01.07.2023). (In Russian)
- Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh obektov (AIS GMVO) [Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS SMWB)], URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (access date 01.07.2023). (In Russian)
- CALM Program Description, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/about/program.html> (access date 01.07.2023).
- GlobSnow, Finnish meteorological institute, URL: <http://www.globalsnow.info/> (access date 01.07.2023).
- Nauchno-populyarnaya enciklopediya “Voda Rossii” [Popular Science Encyclopedia “Water of Russia”], URL: https://water-rf.ru/Water_objects/434/Kolyma (access date 01.07.2023). (In Russian)

Received 03.09.2023

Revised 15.12.2023

Accepted 14.02.2024