

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-115-130>

УДК 556.06

## **Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов**

***С.В. Борщ, В.М. Колий, Н.К. Семенова,  
Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров***

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

*borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru*

Возможность прогнозирования речного стока определяется максимальной заблаговременностью удовлетворительных прогнозов расходов воды методом экстраполяции гидрографа. Этот показатель характеризует плавность изменения расходов воды во времени и определяет возможности использования автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов речного стока в течение всего года, разработанной в Гидрометцентре России.

Исследована зависимость прогнозируемости речного стока от основных факторов его формирования и режима. На территории России выделены 18 регионов, для каждого из которых получена зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади и среднего уклона поверхности водосбора. Эти регионы занимают 79 % площади всей страны.

Региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью 8–10 суток или, наоборот, только с малой заблаговременностью 1–2 суток, или невозможны вообще.

*Ключевые слова:* прогнозируемость речного стока, экстраполяция гидрографа, максимальная заблаговременность прогнозов, морфометрические характеристики водосбора, региональные расчетные зависимости

## **Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the hydrograph extrapolation method**

***S.V. Borsch, V.M. Koliy, N.K. Semenova,  
Yu.A. Simonov, A.V. Khristoforov***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru*

The predictability of river runoff is determined by the maximum lead time of satisfactory forecasts of water discharge obtained by the hydrograph extrapolation method. This indicator characterizes the smoothness of changes in water discharge over time and determines a possibility of using the Hydrometcentre of Russia's automated system for preparation and daily streamflow forecasting all year long.

The dependency between the predictability of river runoff and the main factors of its formation and regime is investigated. In total 18 regions within the territory of Russia are identified; for each of them a dependence between the streamflow predictability indicator and the area and average slope of the catchment is obtained. These regions cover 79% of the entire country.

Calculated regional dependencies made it possible to estimate threshold values of the area and average slope of the catchment beyond which satisfactory forecasts are possible with a sufficiently long lead time (8–10 days), or only with a short lead time (1–2 days), or are impossible at all.

*Keywords:* streamflow predictability, hydrograph extrapolation method, maximum forecast lead time, morphometric characteristics of catchment, calculated regional dependencies

## Введение

Разработанная в Гидрометцентре России автоматизированная система позволяет выпускать прогноз характеристик стока рек, водосборы которых покрывают практически всю территорию нашей страны. Краткосрочные и среднесрочные прогнозы расходов и уровней воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток выпускаются ежедневно в течение всего года. В данной системе используется метод экстраполяции гидрографа, при котором прогнозируемое значение характеристики стока определяется в зависимости от ее значений за дату составления прогноза и за пять предыдущих суток [3].

Если показатели качества прогноза речного стока снижаются с ростом его заблаговременности, то скорость такого снижения до неудовлетворительных значений определяет прогнозируемость стока конкретной реки проверяемым методом, которую целесообразно определить как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов. Оценка прогнозируемости стока конкретной реки различными методами в зависимости от характеристик ее водосбора представляет несомненный научный и практический интерес, так как позволяет заранее ориентироваться на наиболее подходящие методы прогнозирования и отбрасывать заведомо неприемлемые.

Верификация по ежедневным данным гидрологических наблюдений за период с 2010 по 2019 год показала, что удовлетворительные прогнозы среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа с заблаговременностью одни сутки могут быть получены для 1000 створов, с заблаговременностью пять суток – для 382 речных створов, а с заблаговременностью десять суток – для 240 створов [3].

Установлено, что применяемый метод позволяет получать удовлетворительные прогнозы с максимальной заблаговременностью для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора. Для таких рек медленное формирование речного стока обеспечивает плавные очертания гидрографа, который можно достаточно точно экстраполировать на значительный промежуток времени. Для рек с малой площадью и большим уклоном

водосбора формирование стока происходит быстро, поэтому ход среднесуточных расходов имеет пилообразный характер и его сложно предсказывать с достаточной точностью даже на ближайшие сутки [3].

В современной гидрологии факторы формирования речного стока и особенности его колебаний во времени достаточно хорошо изучены. Ведущими из них являются климат и ландшафтная структура водосбора [4, 5, 9, 11, 12]. Следовательно, учет морфометрических характеристик водосбора конкретной реки при оценке прогнозируемости ее стока методом экстраполяции гидрографа возможен только в пределах достаточно однородного в географическом отношении региона. Решению такой задачи и посвящена настоящая статья.

### Показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа

В отечественной гидрологии качество краткосрочных и среднесрочных гидрологических прогнозов при их заданной заблаговременности  $\Delta t$  характеризуется двумя тесно связанными между собой показателями:

– отношением  $S/\sigma_{\Delta}$  их среднеквадратической погрешности  $S$  к погрешности инерционных прогнозов  $\sigma_{\Delta}$  по известным значениям прогнозируемой величины на дату составления прогноза;

– оправдываемостью  $P$ , равной частоте случаев, когда абсолютные значения их ошибок прогноза не превышают допустимую ошибку  $0,674 \sigma_{\Delta}$ .

При достаточно большом количестве проверочных прогнозов их результаты считаются удовлетворительными, если выполняются неравенства  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и  $P \geq 60\%$  [2].

Как правило, с ростом заблаговременности прогнозов отношение  $S/\sigma_{\Delta}$  растет, а их оправдываемость  $P$  снижается. Однако возможны исключения, когда для больших рек с плавными очертаниями гидрографов при небольшой заблаговременности прогнозов их малая среднеквадратическая погрешность  $S$  может сочетаться с настолько малой величиной  $\sigma_{\Delta}$ , что показатель  $S/\sigma_{\Delta}$  может превысить критическое значение  $0,80$ , а показатель  $P$  может оказаться ниже  $60\%$ . В то же время при дальнейшем росте заблаговременности прогнозы становятся удовлетворительными [3]. Данное обстоятельство затрудняет получение общего показателя прогнозируемости стока конкретной реки на основе величин  $S/\sigma_{\Delta}$  и  $P$  при различных значениях  $\Delta t$  заблаговременности прогноза.

В связи с этим в предлагаемой работе используется другой показатель качества прогнозирования характеристик речного стока с заблаговременностью  $\Delta t$  – коэффициент корреляции  $R(\Delta t)$  между их фактическими и прогнозируемыми значениями. При прогнозировании среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа показатель  $R(\Delta t)$  равен множественному коэффициенту корреляции между

прогнозируемым расходом воды  $Q(t + \Delta t)$  и известными к дате составления прогноза  $t$  расходами  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$ , ...,  $Q(t-5)$ . Квадрат этой величины  $R^2(\Delta t)$  равен широко используемому в зарубежной практике моделирования и прогнозирования речного стока показателю Нэша – Сатклиффа [2]. Величина  $R(\Delta t)$  всегда снижается с ростом заблаговременности прогноза  $\Delta t$ , а неравенство  $R(\Delta t) > 0,9$ , как правило, обеспечивает удовлетворительность прогнозов по показателям  $S/\sigma_{\Delta}$  и  $P$ .

С учетом отмеченных обстоятельств показатель  $\Delta_{\max}$  прогнозируемости стока в конкретном речном створе определяется таким образом, что прогнозы, для которых выполняется условие  $R(\Delta t) > 0,9$ , могут быть получены при всех значениях заблаговременности  $\Delta t$ , не превышающих величину  $\Delta_{\max}$ .

Из данного определения следует, что при условии  $\Delta_{\max} = 10$  коэффициент корреляции  $R(\Delta t)$  между фактическими значениями расходов воды и их прогнозами превышает величину 0,9 при всех значениях заблаговременности  $\Delta t$  от 1 до 10 суток, что означает удовлетворительность прогнозов среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа при любой рассматриваемой заблаговременности. При условии  $\Delta_{\max} = 0$  коэффициент корреляции  $R(\Delta t)$  оказывается меньше 0,9 даже при заблаговременности одни сутки, что означает неудовлетворительность прогнозов данным методом при любой заблаговременности.

Показатель  $\Delta_{\max}$  можно рассматривать как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, так как в большинстве случаев его значения незначительно отличаются от аналогичной по сути, но несколько иначе определяемой величины, рассмотренной в [3].

При использовании метода экстраполяции гидрографа показатель  $\Delta_{\max}$  в максимально полной степени характеризует плавность изменения расходов воды во времени и возможность его предсказания. Таким образом, он является оригинальной, но весьма важной с практической точки зрения характеристикой водного режима реки.

### **Используемые морфометрические характеристики водосборов**

При исследовании зависимости показателя  $\Delta_{\max}$  от характеристик соответствующих водосборов использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России.

Особенности гидрографов каждого речного створа определяются режимом выпадения осадков и температуры воздуха, особенностями подстилающей поверхности, формой и размерами водосбора, а также факторами хозяйственной деятельности, влияющими на водный режим

реки [7, 10, 13]. Для водосборов, находящихся в одинаковых природных условиях, решающее значение имеют их морфометрические характеристики, которые определяют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков. При прочих равных условиях эта скорость определяется временем склонового и руслового добегаания [5, 12].

С учетом данного обстоятельства среди различных морфометрических характеристик водосбора в качестве основных выбраны его площадь  $A$  и средний уклон его поверхности  $I$ .

Площадь водосбора характеризует расстояние до замыкающего створа, которое преодолевают талые, дождевые и подземные воды. Кроме того, с увеличением площади водосбора растет число притоков с несинхронными колебаниями водности, и суперпозиция поступающих в основное русло расходов воды этих притоков сглаживает гидрограф в замыкающем створе. Средний уклон водосбора характеризует скорость поверхностного, внутрпочвенного и подземного стекания воды по склонам и скорость движения воды в русловой сети. Таким образом, при прочих равных условиях плавность изменения расходов воды во времени должна возрастать с увеличением площади водосбора и уменьшением его среднего уклона [5, 12]. Следовательно, с увеличением  $A$  и уменьшением  $I$  показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа  $\Delta_{\max}$  также должен расти.

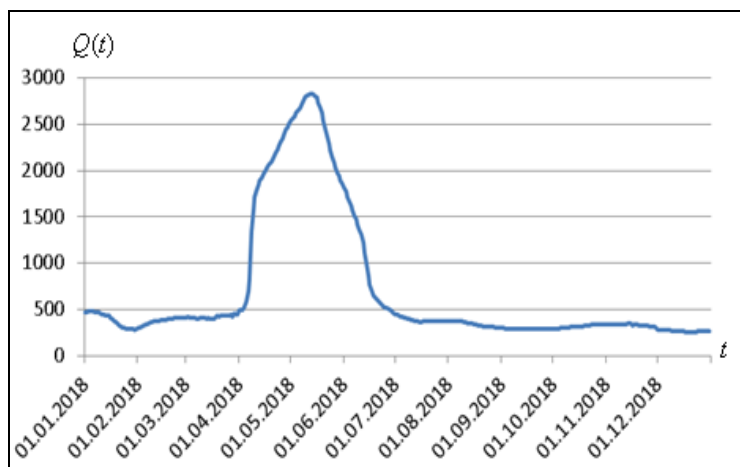
В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены гидрографы 2018 года для расположенного выше Цимлянского водохранилища створа реки Дон у станции Новогригорьевская и створа его притока второго порядка – реки Ворона у села Чутановка. Первый водосбор имеет в 37,4 раза большую площадь, в 1,6 раза меньший уклон и значительно более плавные очертания гидрографа. В результате показатель прогнозируемости расходов воды для реки Дон составляет  $\Delta_{\max} = 10$  суток, а для его притока всего  $\Delta_{\max} = 1$  сутки.

Значения площади водосборов взяты из Перечня действующих постов сети Росгидромета (RU\_RIHMI-WDC\_2665) [6].

Средний уклон поверхности водосбора рассчитан с помощью цифровой модели рельефа всей территории России с пространственным разрешением 1 км, созданной на основе топографических карт масштаба 1:100 000. В качестве замыкающего створа использованы координаты гидрологического поста.

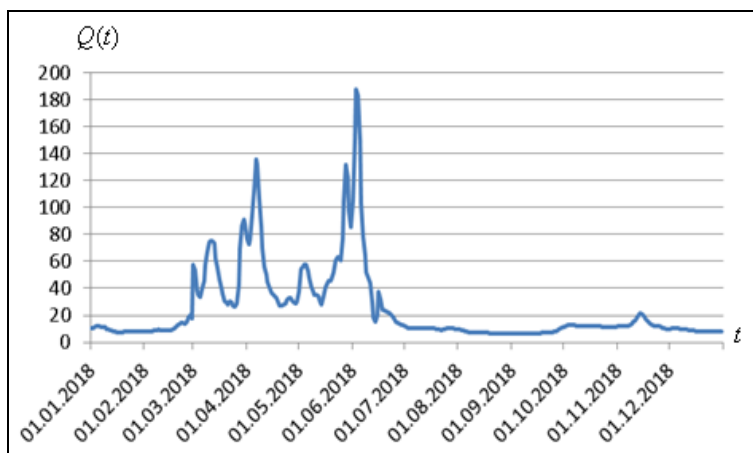
В качестве исходных данных использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России. Среди них отсутствуют створы на реках, естественный водный режим которых существенно нарушен водохранилищами, расположенными выше по течению. Для каждого речного створа по данным ежедневных наблюдений была рассчитана максимальная заблаговременность прогноза расходов

воды методом экстраполяции гидрографа  $\Delta_{\max}$  и получены значения площади  $A$  и среднего уклона поверхности водосбора  $I$ .



**Рис. 1.** Гидрограф 2018 г. в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская с характеристиками:  $A = 208000 \text{ км}^2$ ,  $I = 0,56 \text{ ‰}$ ,  $\Delta_{\max} = 10 \text{ сут.}$

**Fig. 1.** Hydrograph at the river Don – Novogrigorevskaya in 2018 with features:  $A = 208000 \text{ sq km}$ ,  $I = 0,56 \text{ ‰}$ ,  $\Delta_{\max} = 10 \text{ days.}$



**Рис. 2.** Гидрограф 2018 г. в створе р. Ворона – с. Чутановка с характеристиками:  $A = 5560 \text{ км}^2$ ,  $I = 0,89 \text{ ‰}$ ,  $\Delta_{\max} = 1 \text{ сут.}$

**Fig. 2.** Hydrograph at the river Vorona – Chutanovka in 2018 with features:  $A = 5560 \text{ sq km}$ ,  $I = 0,89 \text{ ‰}$ ,  $\Delta_{\max} = 1 \text{ day.}$

Среднее для всех этих речных створов значение площади водосбора равно  $\bar{A} = 25634 \text{ км}^2$ , Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации  $Cv(A) = 6,09$ . Среднее значение уклона водосбора равно  $\bar{I} = 1,96 \%$ . Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации  $Cv(I) = 1,23$ . Таким образом, относительная изменчивость площадей водосборов почти в 5 раз превышает относительную изменчивость их средних уклонов. Уже только это обстоятельство делает площадь водосбора более значимым аргументом при построении эмпирических зависимостей показателя  $\Delta_{\max}$  от характеристик  $A$  и  $I$ .

В качестве первого приближения анализировалась зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади водосбора  $A$  и от среднего уклона его поверхности  $I$  для всей территории России по данным всех 1879 речных створов. С этой целью рассматривались различные варианты функции  $f(A, I)$ , для каждого из которых оценивался коэффициент корреляции  $r$  между  $f(A, I)$  и показателем  $\Delta_{\max}$ . В качестве оптимального был выбран вариант  $f(A, I)$ , для которого коэффициент  $r$  принял максимальное значение. Таким оптимальным вариантом оказался логарифм площади водосбора  $\ln(A)$ . Максимальное значение  $r$  оказалось равным 0,50. Теснота зависимости  $\Delta_{\max}$  от  $\ln(A)$  оказалась недостаточной для оценки прогнозируемости стока в конкретных речных створах по известным для них значениям  $A$  и  $I$ . В связи с этим поиск более тесных зависимостей показателя  $\Delta_{\max}$  от оптимального варианта функции  $f(A, I)$  производился для относительно однородных в географическом отношении регионов.

### **Зависимость прогнозируемости речного стока от морфометрических характеристик водосбора для отдельных регионов России**

В идеале регион, в котором может использоваться единая для всех входящих в него водосборов и достаточно тесная зависимость показателя прогнозируемости речного  $\Delta_{\max}$  от их площади  $A$  и среднего уклона  $I$ , должен быть однородным по всем остальным условиям формирования водного режима рек, включая климат, рельеф, ландшафтную структуру, гидрогеологические условия и факторы хозяйственной деятельности. Однако стремление к максимальной географической однородности выделяемого региона вступает в противоречие с необходимостью выделения крупного региона с достаточно большим числом гидрологических постов, данные которых необходимы для построения регионально расчетной зависимости характеристики речного стока (в данном случае показателя

$\Delta_{\max}$ ) от морфометрических и других азональных характеристик водосбора [8].

С учетом отмеченных выше обстоятельств, при выделении регионов с единой расчетной зависимостью показателя  $\Delta_{\max}$  от площади  $A$  и среднего уклона  $I$  входящих в этот регион водосборов преследовалась цель добиться по крайней мере его относительной географической однородности. Для достижения этой цели учитывалась информация, содержащаяся в Большом географическом атласе России [1]. Использовались полученные различными авторами карты типов водного режима рек СССР и России [5].

Процедура выделения каждого региона включала следующие этапы:

- выделение «ядра», образованного водосборами с достаточно близкими условиями формирования речного стока и его режима;
- предварительное определение оптимального варианта функции  $f(A, I)$ , имеющей максимальный коэффициент корреляции  $r$  с показателем  $\Delta_{\max}$ ;
- добавление соседних водосборов, если представляющие их данные заметно не снижают коэффициент  $r$ ;
- уточнение оптимального варианта функции  $f(A, I)$  и зависимости от него показателя  $\Delta_{\max}$ ;
- отбрасывание соседних водосборов, если представляющие их данные заметно ухудшают эту зависимость.

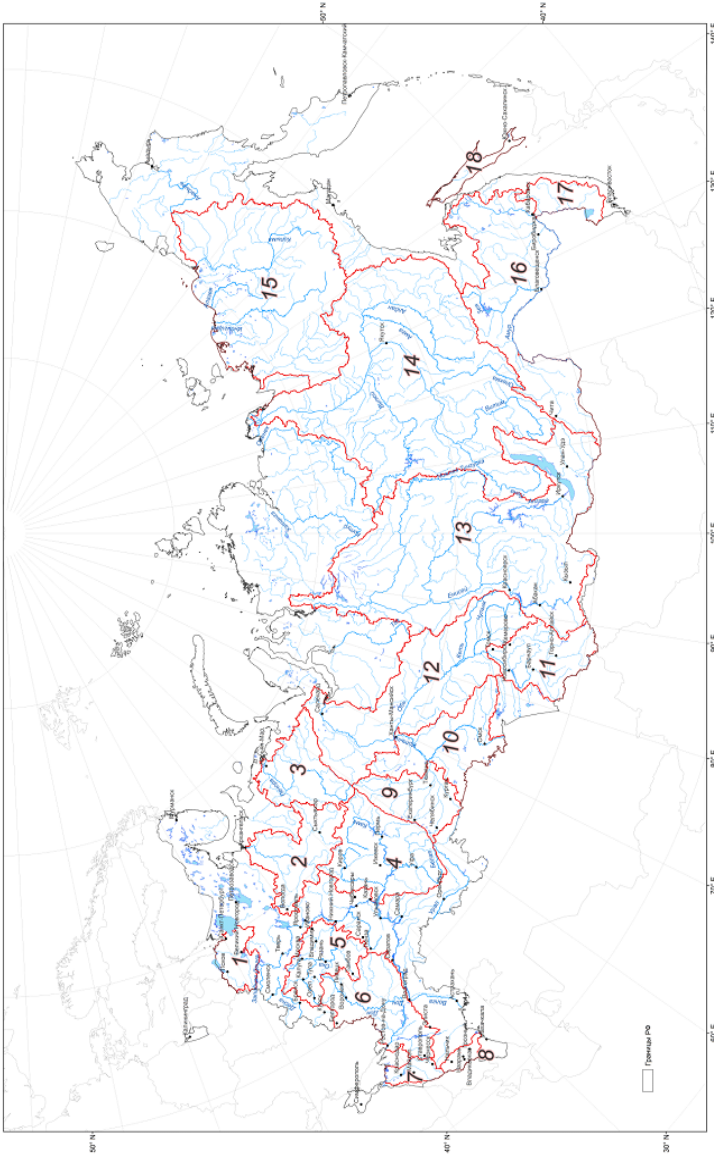
Отечественный и зарубежный опыт показывает, что, как правило, при разработке автоматизированных систем подготовки и выпуска гидрологических прогнозов используется бассейновый принцип [7, 10, 13]. Исходя из этого, большинство регионов с единой расчетной зависимостью  $\Delta_{\max}$  от  $A$  и  $I$  являются бассейнами крупных рек.

Регионы, совпадающие с огромными бассейнами Енисея, Лены и Амура, не могут считаться относительно однородными в географическом отношении. Однако в условиях характерной для них редкой сети гидрологических постов их дробление приводило к тому, что для некоторых вновь образованных регионов зависимость  $\Delta_{\max}$  от  $A$  и  $I$  заметно улучшалась, а для других недопустимо ухудшалась.

Таким образом, выделено 18 регионов с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока  $\Delta_{\max}$  от соответствующей каждому региону функции морфометрических характеристик водосбора  $f(A, I)$ . Эти регионы покрывают 79 % площади всей страны и представлены на рис. 3.

В табл. 1 для каждого региона приведены его номер, название, число речных створов  $N$ , оптимальный для данного региона морфометрический аргумент  $f(A, I)$  и коэффициент его корреляции  $r$  с показателем  $\Delta_{\max}$ .





**Рис. 3.** Регионы с расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока  $\Delta_{\max}$  от функции морфометрических характеристик водосбора  $f(A, I)$ .

**Fig. 3.** Regions with calculated dependence predictability indicator of river flow  $\Delta_{\max}$  as the function of morphometric characteristics of catchment area  $f(A, I)$ .

**Таблица.** Характеристики выделенных регионов  
**Table** Characteristics of the selected catchments

№	Регион	$N$	$f(A, I)$	$r$
1	Северо-Запад России	71	$\ln(A)$	0,76
2	Бассейн Северной Двины	75	$\ln(A)$	0,77
3	Бассейн Печоры	46	$A$	0,84
4	Бассейн Камы	129	$\sqrt{A/I}$	0,82
5	Бассейн Оки	66	$\sqrt{A/I}$	0,84
6	Бассейн Дона	75	$\ln(A)$	0,80
7	Бассейн Кубани	25	$\sqrt{A/I}$	0,77
8	Бассейн Терека	33	$\ln(A) + 1,3 \ln(I)$	0,76
9	Бассейн Тобола	36	$\ln(A)$	0,81
10	Бассейн Иртыша	78	$\ln(A/I)$	0,80
11	Бассейн Верхней Оби	162	$\sqrt{A/I}$	0,82
12	Бассейн Нижней Оби	32	$\ln(A)$	0,91
13	Бассейн Енисея	80	$\sqrt{A/I}$	0,76
14	Бассейн Лены	88	$\ln(A/I)$	0,75
15	Северо-Восток России	63	$\ln(A) + 1,3 \ln(I)$	0,79
16	Бассейн Амура	54	$\ln(A)$	0,88
17	Приморье	43	$A$	0,75
18	Сахалин	25	$\sqrt{A/I}$	0,75

В приведенной таблице обращает на себя внимание, что использование для бассейна Терека в качестве оптимального аргумента  $f(A, I) = \ln(A) + 1,3 \ln(I)$  свидетельствует о том, что в данном регионе максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов  $\Delta_{\max}$  увеличивается с ростом среднего уклона поверхности речного бассейна. Столь неожиданный результат имеет достаточно простое объяснение.

Наибольшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном высоко в горах. Для них преобладает снеговое и ледниковое питание. Оно обеспечивает плавные очертания волны половодья и гидрографа в целом. Наименьшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном на равнине. Для них преобладает дождевое питание. Оно обеспечивает резкие очертания отдельных паводков и пилообразный характер гидрографа в целом [4, 5]. Таким образом, для бассейна Терека средний уклон поверхности речного бассейна косвенно характеризует расположение водосбора реки и режим ее питания, а он, в свою

очередь, определяет особенности очертаний гидрографа и возможности его экстраполяции.

Метод экстраполяции гидрографа применялся для получения прогноза расходов воды с заблаговременностью  $\Delta t$  от 1 до 10 суток. В связи с этим значения показателя  $\Delta_{\max}$ , определяющего максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, также ограничены 10 сутками. В результате для многих регионов зависимость этого показателя от морфометрического аргумента  $f(A, I)$  становится нелинейной по мере его увеличения и приближения величины  $\Delta_{\max}$  к 10. Это приводит к тому, что коэффициент корреляции  $r$ , который характеризует тесноту статистической связи и степень ее линейности, занижает фактическую тесноту зависимости  $\Delta_{\max}$  от аргумента  $f(A, I)$ . Если бы расходы воды прогнозировались с заблаговременностью более 10 суток, характер этой зависимости имел бы линейный характер во всем диапазоне анализируемых значений и коэффициенты корреляции  $r$  были бы больше.

Для всех выделенных регионов зависимость показателя  $\Delta_{\max}$  от оптимального варианта функции морфометрических характеристик  $f(A, I)$  оказалась недостаточно тесной для надежного определения максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов расхода воды в речном створе при известных значениях площади  $A$  и среднего уклона поверхности  $I$  его водосбора. Однако эти зависимости позволяют оценить предельно низкое значение  $f(A, I)$ , которое обеспечивает удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью, и предельно высокое, при котором удовлетворительные прогнозы возможны только с малой заблаговременностью или невозможны вообще ( $\Delta_{\max} = 0$ ).

Ниже приводятся примеры подобных расчетов для некоторых регионов России.

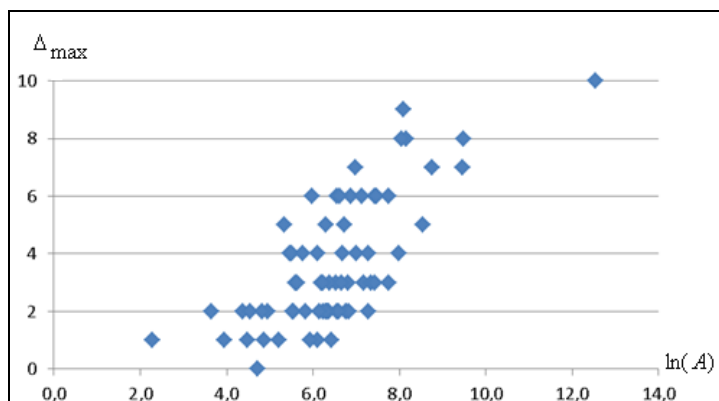
На рис. 4 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A)$ , полученный для Северо-Запада России (Ленинградская область, часть Псковской и Новгородской областей).

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

– для речных створов с показателями  $\ln(A) > 9$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;

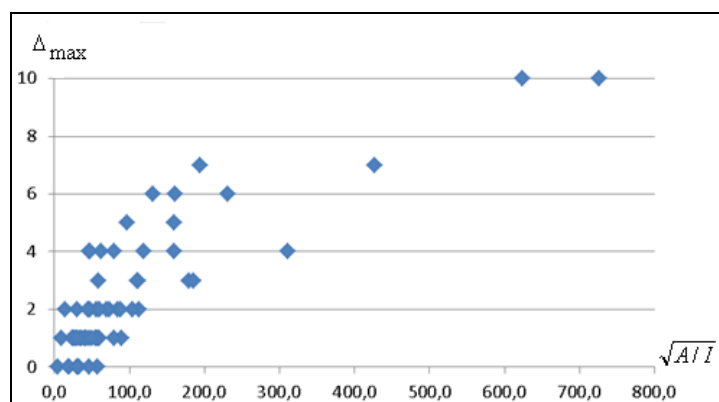
– для речных створов с показателями  $\ln(A) < 5$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рис. 5 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов  $\Delta_{\max}$  от величины  $\sqrt{A/I}$ , полученный для бассейна Оки.



**Рис. 4.** График зависимости показателя  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A)$ , полученный для Северо-Запада России.

**Fig. 4.** Dependence between indicator  $\Delta_{\max}$  and value  $\ln(A)$  obtained for Russia North-West.



**Рис. 5.** График зависимости показателя  $\Delta_{\max}$  от величины  $\sqrt{A/I}$ , полученный для бассейна Оки.

**Fig. 5.** Dependence between indicator  $\Delta_{\max}$  and value  $\sqrt{A/I}$  obtained for river Oka basin.

График на рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

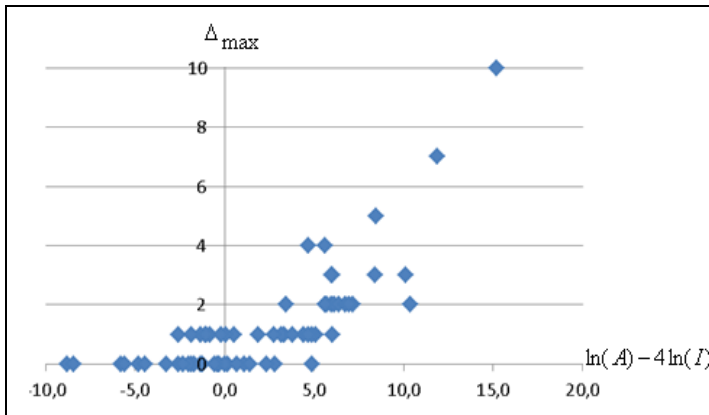
- для речных створов с показателями  $\sqrt{A/I} > 400$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;
- для речных створов с показателями  $\sqrt{A/I} < 50$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рис. 6 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A) - 4\ln(I)$ , полученный для Северо-Востока России (бассейны Яны, Индигирки, Колымы).

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

– для речных створов с показателями  $\ln(A) - 4\ln(I) > 12$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;

– для речных створов с показателями  $\ln(A) - 4\ln(I) < 5$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.



**Рис. 6.** График зависимости показателя  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A) - 4\ln(I)$ , полученный для Северо-Востока России.

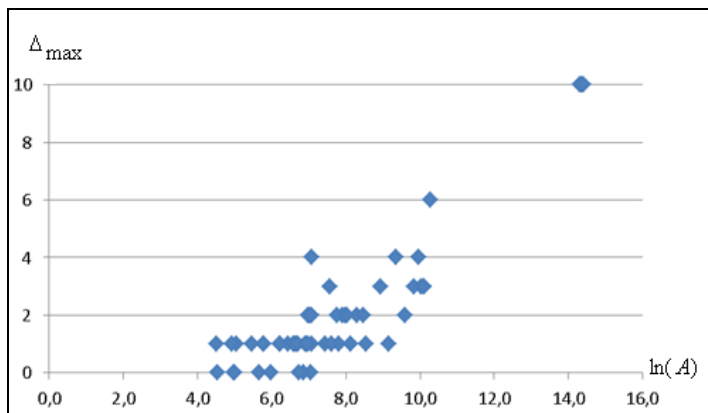
**Fig. 6.** Dependence between indicator  $\Delta_{\max}$  and value  $\ln(A) - 4\ln(I)$  obtained for Russia North-East.

На рис. 7 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A)$ , полученный для бассейна Амура.

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

– для речных створов с показателями  $\ln(A) > 11$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;

– для речных створов с показателями  $\ln(A) < 7$  метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более суток.



**Рис. 7.** График зависимости показателя  $\Delta_{\max}$  от величины  $\ln(A)$ , полученный для бассейна Амура.

**Fig. 7.** Dependence between indicator  $\Delta_{\max}$  and value  $\ln(A)$  obtained for river Amur basin.

### Заключение

Выполненная оценка прогнозируемости стока рек России методом экстраполяции гидрографа позволяет уточнить возможности использования автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов речного стока в течение всего года, разработанной в Гидрометцентре России. В качестве показателя прогнозируемости речного стока предложена максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов среднесуточных расходов воды, для которых коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами превышает 0,9. Данный показатель характеризует плавность изменения расходов воды во времени и может рассматриваться в качестве важной с практической точки зрения характеристики водного режима.

На основе данных по 1989 речным створам, расположенным практически по всей территории России, исследована зависимость прогнозируемости речного стока от основных факторов его формирования и режима. Для относительно однородных в географическом отношении территорий выполнен анализ зависимости показателя прогнозируемости речного стока от площади водосборов и среднего уклона их поверхности, которые характеризуют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков, от которых в конкретных природных условиях зависит плавность гидрографов реки.

Выделены 18 регионов, для каждого из которых получена достаточно тесная региональная зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади и среднего уклона поверхности водосбора. Эти регионы

покрывают 79 % площади России и в основном являются бассейнами крупных рек.

Полученные региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью или, наоборот, только с малой заблаговременностью, или невозможны вообще.

### Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. М.: Изд-во АСТ, 2019. 224 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
4. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
5. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 733 с.
6. Перечень действующие гидрологические посты сети Росгидромета (RU\_RIHMI-WDC\_2665).
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
8. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.
9. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
10. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. Geneva: WMO, 2009. 738 p.
11. Handbook of Hydrology. New York: Mc Graw Hill, 1993. 978 p.
12. Dingman S.L. Physical Hydrology. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 575 p.
13. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. Geneva: WMO, 2011. 138 p.

### References

1. Bol'shoy geograficheskiy atlas Rossii. Ed. by G.V. Borisova. Moscow, AST publ., 2019, 224 p. [in Russ.].
2. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
3. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].

4. *Evstigneev V.M.* Rechnoy stok i gidrologicheskie raschety. Moscow, MGU publ., 1990, 304 p. [in Russ.].
5. *Zakonomernosti gidrologicheskikh processov.* Ed. by N.I. Alekseevskogo. Moscow, GEOS publ., 2012, 733 p. [in Russ.].
6. *Perechen' deystvuyushchie gidrologicheskie posty seti Rosgidrometa (RU\_RIHMI-WDC\_2665)* [in Russ.].
7. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
8. *Khristoforov A. V.* Nadejnost' raschetov rechnogo stoka. Moscow, MGU publ., 1993, 166 p. [in Russ.].
9. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group publ., 2004, 1024 p.
10. *Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168.* Geneva, WMO, 2009, 738 p.
11. *Handbook of Hydrology.* New York: Mc Graw Hill publ., 1993, 978 p.
12. *Dingman S.L.* Physical Hydrology. New York: Macmillan Publishing Company publ., 1993, 575 p.
13. *Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072.* Geneva, WMO, 2011, 138 p.

*Поступила 15.06.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;  
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 15.06.2021; approved after reviewing 14.09.2021;  
accepted for publication 28.09.2021.*