

УДК 556.5

## **ВАРИАЦИИ И ОЦЕНКИ СРЕДНИХ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ В РЕКАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

**В. М. Михайлов**

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН), г. Якутск  
Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция (СВНИМС ИМЗ СО РАН),  
г. Магадан  
E-mail: svnims@mail.ru*

Исследованы вариации средних максимальных расходов воды по территории региона и их зависимость от площадей водосборов в четырех обеспеченных данными бассейнах (рр. Индигирка, Яна, Колыма и Охотского моря в пределах Магаданской области). Рассчитаны параметры эмпирических формул для оценки искомой характеристики на неизученных участках рек. Показано, что теснота связи максимальна в выборках ветвящихся водотоков. Рассмотрены причины низкой коррелированности исследуемых характеристик в отдельных бассейнах и выборках.

**Ключевые слова:** средний максимальный расход, площадь водосбора, корреляция, эмпирические формулы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучению геологической деятельности рек на Северо-Востоке России традиционно придается большое значение ввиду ее непосредственного влияния на формирование аллювиальных россыпных месторождений (Билибин, 1955; Карташов, 1972). Один из ее важных аспектов – морфодинамика речных русел. В исследованиях по данному направлению, начиная с работы (Leopold, Wolman, 1957), широко применяется анализ графиков, получивших название « $QI$ -диаграммы», где символ  $I$  обозначает уклон речного русла (в более поздних исследованиях днища долины);  $Q$  – некий характерный расход воды. В отечественной литературе предпочтение отдается руслоформирующему расходу (Чалов, 2008), при котором переносится наибольшее количество наносов; в зарубежной – величине, именуемой «bankfull discharge» – «расход, заполняющий русло». Определение обеих характеристик довольно трудоемко и может давать неоднозначные результаты (особенно второй из них, и особенно для распластанных речных русел, широко распространенных на Северо-Востоке России). Альтернативой является использование среднего максимального расхода (точнее, среднего многолетнего значения максимального в году суточного расхода)  $\bar{Q}_{\max}$  (Чалов, 2008) – стандартной гидрологической характеристики.

Северо-Восток России выделяется среди сопредельных регионов относительно плотной сетью гидрометрических постов, сосредоточенных главным образом в районах россыпной золотоносности (верховья рр. Колымы и Индигирки). Тем не менее репрезентативность имеющихся данных оставляет желать лучшего. Из морфодинамических типов рек более или менее полно представлены лишь врезанные русла. Сведения по широкопойменным ветвящимся рекам также многочисленны, но не включают водотоки, находящиеся в стадии накопления аллювия (принадлежащие преимущественно к бассейну Охотского моря). Наиболее скудны сведения по меандрирующим рекам, которые занимают одну из двух позиций: это либо равнины (включая межгорные котловины), где промышленные россыпи отсутствуют и посты немногочисленны, либо верховья речных систем. Из последней категории данные имеются лишь по одному водотоку – руч. Долгий в бассейне р. Колымы.

Для того чтобы расширить возможности использования в расчетах и прогнозах характеристик ряда  $Q$ , применяются региональные (бассейновые) эмпирические зависимости  $Q(F)$ , где  $F$  – площадь водосбора. Как правило, их точность невелика и уменьшается с расширением исследуемой территории из-за увеличения вариаций факторов, определяющих расходы воды (режим выпадения осадков, расчлененность бассейна,

интенсивность снеготаяния и т. д.), однако местами они могут давать вполне удовлетворительные результаты. В настоящей работе рассматривается возможность применения подобных формул для оценки средних максимальных расходов отдельно по четырем крупным бассейнам Северо-Востока России, обеспеченным данными наблюдений: рр. Яны, Индигирки, Колымы и Охотского моря в пределах Магаданской области.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Увлажненность территории Северо-Востока России значительно убывает от Охотоморского бассейна к Янскому – так, среднегодовые значения модуля стока у рек с площадью водосбора порядка 20 тыс. км<sup>2</sup> уменьшаются более чем втрое. Еще контрастнее различия малых водотоков. В восточной Якутии с ее экстремально холодными и продолжительными зимами бессточный период у ручьев IV порядка (по системе Хортон – Штралера) занимает большую часть года, тогда как вблизи Охотского побережья многие из них имеют круглогодичный сток.

В пределах крупных бассейнов вариации характеристик речного стока также могут быть существенными. Так, в двух смежных и практически равновеликих водосборах рр. Аян-Юрях и Кулу, сливанием которых начинается Колыма, и годовые, и июньские (наибольшие из среднемесячных) модули стока различаются более чем на 30%. На первый взгляд расходы меньшей обеспеченности, более зависимые от локальных факторов, должны варьировать еще сильнее. Однако на самом деле величины  $\bar{Q}_{\max}/F$  в этих бассейнах различаются всего на 6%; это дает основания рассчитывать на достаточно тесную связь исследуемых характеристик.

В вычислениях использованы данные гидрологических справочников о средних максимальных расходах воды и соответствующих площадях водосборов (Многолетние..., 1985; 1987). В основных вариантах расчетов учитыва-

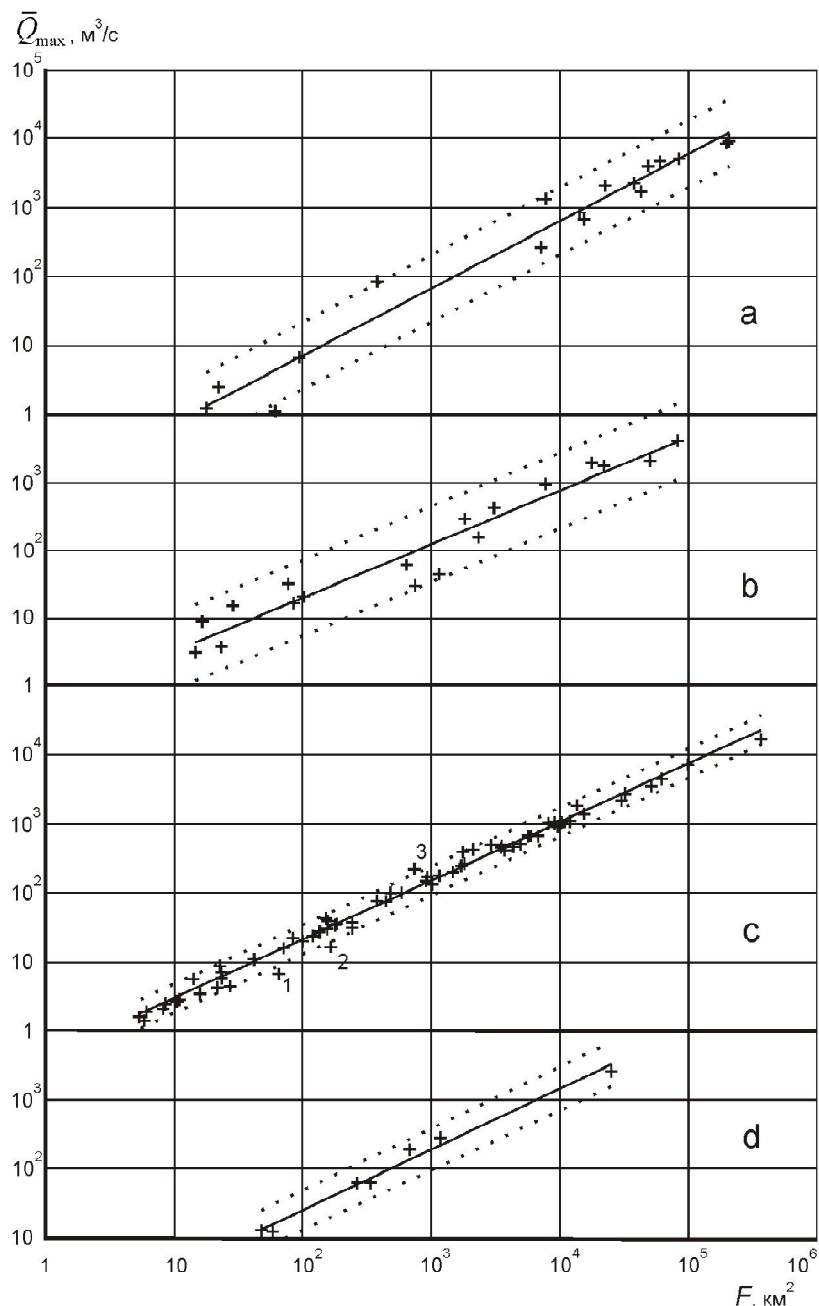


Рис. 1. Связь  $\bar{Q}_{\max}(F)$  в рассматриваемых бассейнах: а – р. Яна; б – р. Индигирка; в – р. Колыма; д – Охотское море. Линии регрессии – сплошные, пунктирами показаны границы 95%-ных доверительных областей. Станции, обозначенные на рис. 1, с цифрами, расположены на водотоках: 1 – руч. Талок; 2 – руч. Долгий; 3 – р. Оротукан; 4 – р. Колыма, г. Среднеколымск.

Fig. 1. Regression graphs  $\bar{Q}_{\max}(F)$  in the basins discussed: a – the Yana R.; b – the Indigirka R.; c – the Kolyma R.; d – the Sea of Okhotsk. Regression lines are solid; dashed lines indicate the limits of 95% confidence bands. The gauging stations marked with numbers in Fig. 1, c are situated on watercourses: 1 – the Talok Cr.; 2 – the Dolgy Cr.; 3 – the Orotukan R.; 4 – the Kolyma R. at the City of Srednekolymsk

лись все посты с рядами наблюдений 10 и более лет независимо от типа речного русла и физико-географической принадлежности (горы – равнина). Исключены лишь бассейны первого порядка, у

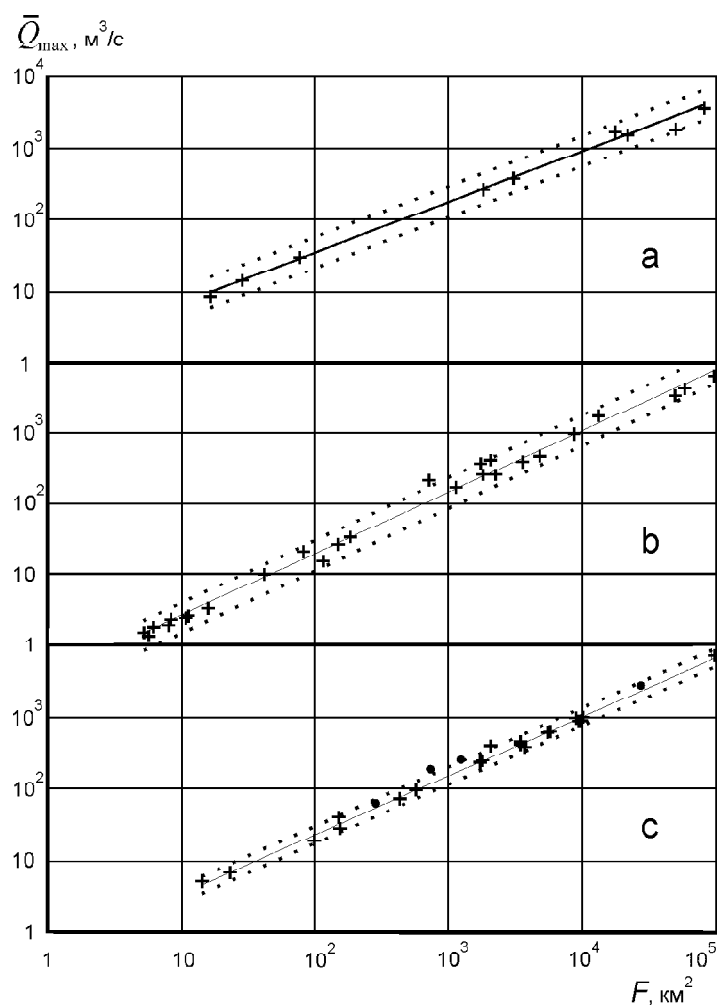


Рис. 2. Связь  $\bar{Q}_{\max}(F)$  в отдельных выборках, по бассейнам: а – р. Индигирка, ветвящиеся реки; б – р. Колыма, врезавшиеся реки; с – р. Колыма, ветвящиеся реки. Условные обозначения те же, что и на рис. 1; на рис. 2, с дополнительно нанесены ветвящиеся реки бассейна Охотского моря (обозначены черными кружками)

Fig. 2. Regression graphs  $\bar{Q}_{\max}(F)$  in separate samplings from the basins: а – the Indigirka R., braided rivers; б – the Kolyma R., incising rivers; с – the Kolyma R., braided rivers. The legend is the same as in Fig. 1; in Fig. 2, с the braided rivers from the Sea of Okhotsk basin are additionally plotted with black circles

которых режим выпадения осадков сильно зависит от ориентации водосбора (площадь, как правило, менее 1 км<sup>2</sup>), линейно вытянутого вдоль единственной отчетливо выраженной в рельефе долины.

В бассейнах рр. Колымы и Индигирки объем имеющихся данных достаточен для осуществления аналогичных расчетов по выборкам, включающим только посты, расположенные на ветвящихся реках, протекающих в пределах горных сооружений, а в первом из них – также и по выборке врезавшихся водотоков. Сведения по посту р. Колыма, пос. Усть-Среднекан использованы в обеих выборках, так как всего в 33 км ниже по течению врезанное русло сменяется ветвящимся. Графики связи представлены на рис. 1, 2.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из рис. 1, 2, рассматриваемые величины довольно тесно коррелируют между собой (во всяком случае, в двух из четырех бассейнов). Зависимость  $\bar{Q}_{\max}(F)$  хорошо аппроксимируется традиционно используемой формулой:

$$\bar{Q}_{\max} = \alpha F^{\beta}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – эмпирические параметры.

Значения  $\alpha$  и  $\beta$ , а также величин, характеризующих тесноту связи  $\bar{Q}_{\max}(F)$ : индексов корреляции и детерминации (соответственно  $\rho$  и  $D = \rho^2 \times 100\%$ ) и средней ошибки аппроксимации  $A$ , представлены в таблице.

Согласно полученным результатам, направленные изменения по территории характера исследуемой зависимости отсутствуют. В Колымском и Охотоморском бассейнах, лежащих по разные стороны от главного водораздела региона, существенно влияющего на влагонесущие потоки, значения обоих параметров близки между собой, здесь же максимальна корреляция исследуемых величин. Далее вглубь материка увлажненность территории продолжает уменьшаться, но при этом коэффициент пропорциональности  $\alpha$  в формуле (1) вначале увеличивается более чем вдвое (бассейн Индигирки), затем уменьшается в еще большей пропорции, тогда как показатель степени  $\beta$  демонстрирует противоположные изменения. В бассейне р. Яны связь  $\bar{Q}_{\max}(F)$  приближается к линейной. Эти вариации отражают сильные различия в характере убывания максимальных расходов вглубь материка в зависимости от крупности рек. При  $F = 10\,000$  км<sup>2</sup> уменьшение средних значений  $\bar{Q}_{\max}$  от одного бассейна к другому (начиная с Охотоморского и заканчивая Янским) происходит относительно плавно, составляя последовательно 32, 29 и 22%. При  $F = 100$  км<sup>2</sup> картина совершенно иная: в бассейнах Колымы и Индигирки средние максимальные расходы практически одинаковы, при этом они на 23% меньше по сравнению с Охотоморским и почти втрое больше, чем в бассейне р. Яны.

Переходя к возможности практических расчетов, отметим следующее. В количественных исследованиях, лежащих вне области точных наук, принято считать, что значения индексов корреляции (или, для случая линейной зависимости, коэффициентов корреляции) 0,8 и выше свидетельствуют о тесной взаимосвязанности рассматриваемых характеристик; более 0,9 – весьма тесной.

**Зависимость  $\bar{Q}_{\max}(F)$  в основных водосборных бассейнах Северо-Востока России**  
**Dependency  $\bar{Q}_{\max}(F)$  in the main drainage basins in Russia's North-East**

Бассейн	Число постов	$\alpha$	$\beta$	$\rho$	$D, \%$	$A, \%$
Данные по всем постам						
р. Яна	17	0,08	0,966	0,91	83	47,1
р. Индигирка	18	0,530	0,788	0,97	94	52,2
р. Колыма	69	0,377	0,862	0,94	88	17,9
Охотское море	7	0,428	0,890	0,95	91	18,5
Участки в стадии врезания						
р. Колыма	28	0,405	0,860	0,98	96	19,3
Участки с ветвящимся руслом						
р. Индигирка	9	1,39	0,710	0,97	93	11,2
р. Колыма	19	0,549	0,820	0,996	99,2	7,2
р. Колыма и Охотское море	23	0,594	0,817	0,997	99,3	12,7

С подобных позиций формулы вида (1) с рассчитанными величинами  $\alpha$  и  $\beta$  (верхняя часть таблицы) вполне пригодны для оценки максимальных расходов в любых пунктах исследуемых бассейнов. Но цифры, приведенные в последней колонке, показывают неправомочность такого подхода и определенную «обманчивость» показателей корреляции. Они имеют наибольшие значения в бассейне р. Индигирки, где средняя ошибка аппроксимации также достигает максимума. Несомненно, что при значениях  $A$ , близких к 50% (бассейны рр. Индигирки и Яны), оценки по формулам вида (1) для практических целей малопримемлемы. В двух остальных водосборах такие расчеты в первом приближении дают удовлетворительные результаты, но при этом в пределах 95%-ных доверительных областей (см. рис. 1) отклонение может достигать 33%.

Причины внутрибассейновых вариаций величин  $\bar{Q}_{\max}$  целесообразно рассмотреть на примере р. Колымы, где они минимальны, несмотря на максимальный объем имеющихся данных (соответственно, этот водосбор наиболее однороден в отношении рассматриваемого показателя). Здесь и далее под вариациями (разбросом)  $\bar{Q}_{\max}$  подразумеваются отклонения от соответствующих линий регрессии. Максимальные отклонения демонстрируют: в меньшую сторону – руч. Долгий и Талок, в большую – р. Оротукан (см. рис. 1,с). Бассейн р. Оротукан от верховьев и вплоть до створа гидрометрического поста отличается сильной расчлененностью рельефа (входящие в него водотоки по большей части находятся в стадии врезания в коренные породы). В таких водосборах влага выпавших осадков быстро поступает в русловую сеть и паводочная волна приобретает наиболее крутой фронт, достигая, при прочих равных условиях, максимальной высоты. В бас-

сейнах руч. Талок и Долгий (его особое положение отмечено выше) глубоко расчленены лишь самые удаленные от постов верховья. Первый из них представляет собой маловодный приток крупной реки Берелех, выше поста на протяжении 4 км протекающий по пологому предгорному шлейфу и высокой террасе этой реки, распаханной под сельхозугодья, и становящийся по существу равнинным водотоком. Второй на большей части своей длины протекает в широкой плоскодонной долине с невысокими и пологими склонами. Эти сходные между собой особенности водосборов способствуют распластыванию волны паводка.

В бассейнах рр. Индигирки и Яны большие площади заняты плоскогорьями (соответственно Оймяконским и Янским), а также и менее обширными выровненными участками. Долины водотоков здесь обладают чертами, аналогичными описанным выше, и даже еще более выраженными. Кроме того, как известно, на подобных территориях, включая верховья речных систем, вообще выпадает минимальное количество осадков; в результате модули максимального стока здесь резко понижены. Именно это обстоятельство, наряду с относительно высокой влагообеспеченностью обрамляющих плоскогорья горных сооружений, вызывают большой разброс значений  $\bar{Q}_{\max}$ . Ввиду малой пригодности универсальных зависимостей вида (1) применимость метода ограничивается здесь пределами отдельных водосборов, однородных в геоморфологическом отношении, при неизменном условии наличия хотя бы одного гидрометрического поста с известным значением среднего максимального расхода ( $\bar{Q}_{\max,1}$ ). Тогда искомая характеристика ( $\bar{Q}_{\max,2}$ ) определится из соотношения:

$$\bar{Q}_{\max,2} = \bar{Q}_{\max,1} (F_2/F_1)^{\beta}, \quad (2)$$

где  $F_2$  и  $F_1$  – соответствующие значения водосборных площадей (очевидно, они не должны сильно отличаться друг от друга). Понятно также, что и в двух остальных бассейнах, несмотря на большую тесноту зависимости  $\bar{Q}_{\max}(F)$ , подобный подход в общем случае предпочтительней.

Для водотоков первого порядка, как и предполагалось, достоверные оценки средних максимальных расходов невозможны. Из трех таких ручьев, расположенных на территории Колымской водобалансовой станции, расчеты по формуле (1) дают результат, близкий к действительной величине, лишь для руч. Южного. Для руч. Северного оценка завышена на 40%, для руч. Мо-

розова (Водопадный) занижена в 2,5 раза. Очевидно, что при таком разбросе использование формулы (2) не улучшает положения.

В выборках ветвящихся рек корреляция исследуемых величин существенно выше по сравнению с исходными массивами данных (см. таблицу), и средняя ошибка аппроксимации уменьшается до 11,2% (р. Индигирка) и 7,2% (р. Колыма). Наличие столь тесной связи  $\bar{Q}_{\max}(F)$  следует, по-видимому, считать нетривиальным результатом. Согласно сведениям, приведенным в справочном издании (Ресурсы..., 1969), в нижней части рассматриваемого диапазона (горные ручьи с площадями водосборов в десятки и первые сотни квадратных километров) максимальные расходы обеспечиваются интенсивными и кратковременными ливнями. В средней части (тысячи – десятки тысяч квадратных километров)  $\bar{Q}_{\max}$  связаны, как правило, с продолжительными обложными осадками. В р. Колыме у пос. Усть-Среднекан максимальные расходы зачастую приходятся на период весеннего половодья (с наложением дождевых паводков). По-видимому, генетические различия максимальных расходов во всем широчайшем диапазоне дренируемых площадей нивелируются благодаря сходному характеру долин ветвящихся рек и морфологическому подобию их русел (Михайлов, Ушаков, 2002), что обеспечивает одинаковые условия прохождения паводочных волн.

Заслуживает также внимания тот факт, что в выборке врезанных рек значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  мало изменяются по сравнению с исходным массивом (см. таблицу). Качество аппроксимации также остается прежним: значения  $A$  даже несколько увеличиваются (от 17,9 до 19,3%), хотя такое различие статистически малозначимо. Это означает, что кластер ветвящихся рек как бы вложен в общий массив, тяготея к его центру, тогда как врезающиеся реки образуют (в исследуемом аспекте) «рыхлое» множество, не отличаясь даже от равнинных водотоков – так, на рис. 1, с точка, соответствующая р. Колыме у г. Среднеколымска, лежит вблизи от линии регрессии.

В бассейнах рр. Колыма и Индигирка практические расчеты осуществляются с наибольшей точностью для ветвящихся рек. При этом в первом из них применение формулы (2) вместо (1) не дает большого выигрыша, следовательно, достоверные оценки  $\bar{Q}_{\max}$  возможны для любого участка этого обширного бассейна.

Близкое сходство ветвящихся рек по многим показателям, включая небольшие различия в значениях параметров  $\alpha$  и  $\beta$  в Колымском и Охотоморском бассейнах, позволяет повысить точность оценок  $\bar{Q}_{\max}$  во втором из них. Первый способ состоит в «механическом» объединении выборок ветвящихся рек. Хотя вторая содержит всего четыре поста, в совокупной выборке ошибка аппроксимации возрастает почти в 1,5 раза (см. таблицу) из-за систематического отклонения модулей стока в приморском бассейне в большую сторону (см. рис. 2, б). Несмотря на это, точность оценок заметно повышается по сравнению с исходным массивом (в верхней части таблицы). Второй способ заключается в учете данного систематического отклонения путем введения в формулу (1) поправочного коэффициента  $k$ , равного среднему (по четырем постам) значению отношения  $\bar{Q}_{\max}/\bar{Q}_{\max,est}$ , где  $\bar{Q}_{\max,est}$  – расчетный расход для ветвящихся рек бассейна Колымы (на рис. 2, с этой величине соответствуют точки, лежащие на линии регрессии). В итоге средние максимальные расходы ветвящихся рек бассейна Охотского моря рассчитываются по формуле (1) с тем же показателем степени  $\beta$ , что и в Колымском бассейне, и коэффициентом пропорциональности  $\alpha \times k = 0,637$  ( $k = 1,16$ ). При этом средняя ошибка аппроксимации составляет всего 6,8%.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований выяснены (насколько позволяет объем имеющейся информации) причины и масштабы вариаций среднего максимального расхода на территории Северо-Востока России в целом и отдельно в пределах четырех составляющих его бассейнов. Рассчитаны параметры эмпирических зависимостей для оценок искомой характеристики в неизученных водосборах второго и более высоких порядков и значения возможных погрешностей. В самых верхних звеньях речной сети (площадь водосбора 1–2 км<sup>2</sup>) подобные оценки в принципе не могут давать удовлетворительных результатов из-за сильного влияния локальных факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Билибин Ю. А. Основы геологии россыпей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955 (изд. второе). – 471 с.
- Карташов И. П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). – М.: Наука, 1972. – 184 с.
- Михайлов В. М., Ушаков М. В. О некоторых гидро-морфометрических соотношениях для рек Северо-Востока России и критериях их применимости // Тр. ДВНИГМИБ. – 2002. – Вып. 150. – С. 177–187.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Государственный водный кадастр. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – Т. 1. – Вып. 16. – 595 с.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Там же. – 1985. – Т. 1. – Вып. 17. – 430 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Северо-Восток. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – Т. 19. – 282 с.
- Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – Т. 1. – 608 с.
- Leopold L. B., Wolman M. G. River channel patterns – braided, meandering and straight // U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. 282–B. – 1957. – P. 1–85.

## VARIATIONS AND ESTIMATES OF MEAN FLOOD DISCHARGES IN RIVERS OF THE NORTH-EASTERN RUSSIA

*V. M. Mikhailov*

The regional variations of mean flood discharges and their dependency upon drainage areas have been studied in four basins provided with necessary data (the Indigirka, Yana, Kolyma rivers and the Sea of Okhotsk within Magadan Oblast). The empirical formulae parameters for estimating the sought-for quantity in uncharted river reaches have been calculated. The relationship is shown to be the closest in the samplings from braided rivers. The causes of low correlations of the studied characteristics in individual basins and samplings are discussed.

***Key words:* mean flood discharge, drainage area, correlation, empirical formulae.**