

В.М. Сакович, А.В. Сикан, Н.Г. Малышева

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОЗЕРНОСТИ ВОДОСБОРОВ
НА МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК МАЛЫХ РЕК**

V.M. Sakovich, A.V. Sikan, N.G. Malysheva

**ASSESSMENT OF INFLUENCE OF THE LAKE COVERAGE
ON THE LOW FLOW OF SMALL RIVERS**

На примере рек Карелии исследуется влияние озерности водосборов на минимальный сток. Анализируются формулы, используемые для расчета минимального стока малых рек, даются рекомендации по их применению.

Ключевые слова: летняя межень, минимальные расходы воды, озерность, расчетная формула, параметры, оптимизация.

Rivers in Karelia is used for studying of the lake coverage influence on the low flow. Equations applied for computation of the small rivers low flow are analyzed.

Key words: Summer low-water, minimum water discharges, lake percentage, design formula, parameters, optimization.

В гидрологической практике при расчетах минимальных расходов воды неизученных малых рек используется формула А.М. Владимирова [Владимиров, 1970, 1990]:

$$Q_{80\%} = b(A \pm A_1)^m, \quad (1)$$

где $Q_{80\%}$ – минимальный 30-суточный расход воды 80 %-ной обеспеченности, м³/с; A – площадь водосбора, км²; A_1 , b , m – региональные константы (параметры формулы), которые имеют разные значения для зимнего и летне-осеннего стока.

При наличии на водосборе озер действующий нормативный документ «Расчет основных гидрологических характеристик» [СП 33-101-2003] рекомендует вводить в формулу (1) поправочный коэффициент δ_1 , учитывающий повышение минимального стока под влиянием озерности. При этом параметр A_1 принимается равным нулю:

$$Q_{80\%} = bA^m\delta_1. \quad (2)$$

Изучение работ, посвященных оценке влияния озер на минимальный сток [Горошков, 1986] показывает, что в общем случае формула для расчета коэффициента δ_1 имеет вид:

$$\delta_1 = a(1 + cA_{03})^n, \quad (3)$$

где a , c , n – районные параметры; A_{03} – относительная озерность водосбора, %.

В специальной литературе встречаются упрощенные варианты этой формулы. Первый вариант получается из формулы (3) при $a = 1$ и $n = 1$:

$$\delta_1 = (1 + cA_{03}) . \tag{4}$$

Второй вариант – при $a = 1$ и $n = -1$:

$$\delta_1 = 1/(1 - c_1A_{03}), \tag{5}$$

где $c_1 > 0$.

Формула (5) представлена в СП 33-101-2003, однако в настоящее время нет опыта ее практического применения, так как в действовавшие ранее нормативные документы она не входила.

Анализ формул (4) и (5) показывает, что параметр c в формуле (4) для природных водосборов с озерностью до 25 % может меняться в диапазоне от 0,05 до 0,15, а параметр c_1 в формуле (5) – от 0,01 до 0,03 (рис. 1, 2).

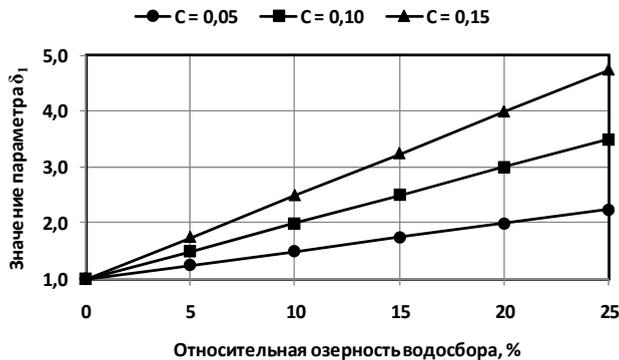


Рис. 1. Зависимость коэффициента δ_1 от относительной озерности водосбора при различных значениях параметра c в формуле (4)

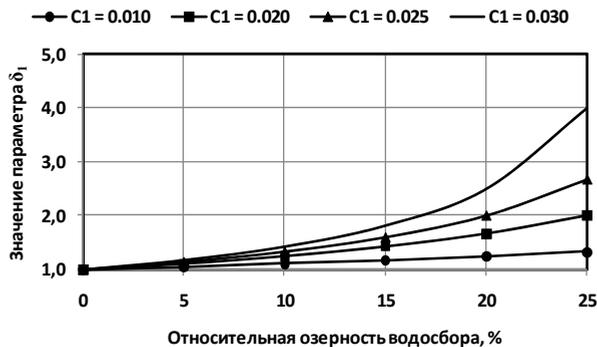


Рис. 2. Зависимость коэффициента δ_1 от относительной озерности водосбора при различных значениях параметра c_1 в формуле (5)

Формула (4) предполагает линейную зависимость между коэффициентом δ_1 и относительной озерностью водосбора, что во многих случаях вполне приемлемо для практических расчетов.

Как видно на рисунках, формула (4) является более предпочтительной по сравнению с формулой (5), так как формула (5) в диапазоне озерности водосборов 5–15 % дает очень незначительную прибавку стока, что не соответствует эмпирическим данным, а при $A_{оз} > 15\%$ форма кривых $\delta_1 = f(A_{оз})$ не характерна для природных озерно-речных комплексов.

При использовании более общей формулы (3) формула (2) принимает вид:

$$Q_{80\%} = b_1 A^m (1 + cA_{оз})^n, \quad (6)$$

где $b_1 = ba$.

Для этой формулы также существует упрощенный вариант, который получается из (6) при $m = 1$, то есть, когда модуль стока является постоянным для водосборов с одинаковой озерностью в пределах исследуемого района:

$$Q_{80\%} = b_1 A (1 + cA_{оз})^n. \quad (7)$$

Если при этом обе части выражения (7) разделить на площадь водосбора и умножить на 1000, получается еще одна формула, представленная в СП 33-101-2003 и приводившаяся в ряде публикаций по данной тематике [Сакович, 1994]:

$$q_{80\%} = b^* (1 + cA_{оз})^n, \quad (8)$$

где $b^* = 1000 \cdot b_1$; $q_{80\%}$ – минимальный 30-суточный модуль стока 80 %-ной обеспеченности, л/(с км²).

Таким образом, при всем разнообразии вариантов можно выделить две формулы: наиболее детальную формулу (6) и ее упрощенный вариант при $m = 1$ и $n = 1$:

$$Q_{80\%} = b_1 A (1 + cA_{оз}). \quad (9)$$

Исследования, выполненные на кафедре гидрологии суши РГГМУ, показали, что переход от классической формулы (1) к формулам (6) и (9) невозможно осуществить только за счет введения коэффициента δ_1 без корректировки всех параметров формулы. Это связано как с изменением структуры самой формулы, так и с тем, что в настоящее время существенно удлинились ряды в опорных створах, используемые при оптимизации и районировании параметров.

Ниже рассматривается порядок оптимизации параметров формул (6) и (9) на примере рек Карелии. В качестве исходных данных использовались минимальные летне-осенние 30-суточные расходы воды.

На первом этапе была выполнена статистическая обработка рядов, которая включала: проверку рядов на случайность и однородность, расчет числовых характеристик и их погрешностей, подбор аналитических функций распределения и расчет минимальных расходов различной обеспеченности [Сикан, 2007].

Проверка на случайность проводилась на основе критерия значимости выборочного коэффициента автокорреляции. Установлено, что вероятностная структура исследуемых рядов соответствует модели случайной величины, что вполне

естественно, так как речные бассейны небольших рек даже при наличии озерности обладают слабой инерционностью в масштабах годового шага дискретности.

Проверка однородности рядов проводилась с использованием критериев Фишера и Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5\%$. Процент опровержения гипотезы об однородности по критерию Стьюдента составил менее 5%, от общего числа рядов, то есть исследуемые ряды являются однородными по среднему значению.

Процент опровержения гипотезы об однородности по критерию Фишера оказался близок к 30%, что значительно выше принятого уровня значимости. Анализ кривых обеспеченностей показал, что причиной опровержения гипотезы об однородности является наличие одной или двух точек, резко отклоняющихся от аналитической кривой в области малых обеспеченностей. В таких ситуациях Свод Правил [СП 33-101-2003] рекомендует использовать критерии Диксона и Смирнова-Граббса. Было установлено, что процент случаев опровержения гипотезы об однородности по этим критериям не превышает 5%, что дает основание считать абсолютное большинство исследуемых рядов однородными.

Расчет параметров распределения проводился методом моментов. Если коэффициент вариации C_v превышал 0,6, параметры пересчитывались методом наибольшего правдоподобия. Во всех случаях ошибки среднего значения и коэффициента вариации не превышали 20% и в среднем колебались в пределах 8–12%.

Учитывая большую погрешность коэффициента асимметрии C_s , расчетное значение отношения C_s/C_v принималось исходя из наилучшего соответствия нижних частей эмпирической и аналитической кривых обеспеченностей. В качестве аналитической кривой использовалась кривая обеспеченностей Крицкого-Менкеля.

На основе проведенного анализа было отобрано более 50 рядов для рек с диапазоном площадей водосборов от 43,3 до 3480 км², по которым были рассчитаны минимальные летне-осенние 30-суточные расходы воды 80%-ной обеспеченности.

Далее был построен график связи минимальных летне-осенних 30-суточных модулей стока 80%-ной обеспеченности от площади водосбора (рис. 3) и определена критическая площадь A_k – граница между малыми и средними реками. Как видно на рисунке, в качестве критической площади можно принять $A_k = 1500$ км².

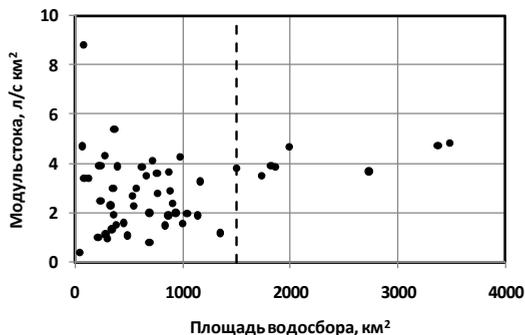


Рис. 3. График связи минимальных летне-осенних 30-суточных модулей стока 80%-ной обеспеченности с площадью водосбора для рек Карелии

Представленные диаграммы наглядно характеризуют влияние исследуемых факторов на минимальный сток. Так, на рис. 5 видно, что для рек Карелии связь между минимальными расходами воды и площадью водосбора близка к линейной, при этом крупные пузырьки расположены вблизи верхней огибающей, то есть озерность водосбора явно повышает минимальный сток.

Диаграмма на рис. 6 показывает, что модуль минимального стока слабо зависит от площади водосбора, но довольно четко прослеживается его связь с озерностью.

Опираясь на анализ полученных эмпирических зависимостей, была проведена параметризация формул (6) и (9).

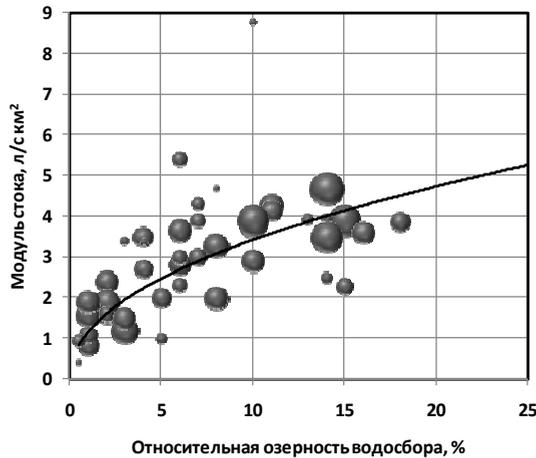


Рис. 6. Зависимость минимальных летне-осенних 30-суточных модулей стока 80 %-ной обеспеченности от относительной озерности водосбора для рек Карелии (величина пузырьков пропорциональна площади водосбора)

Для оценки параметров формулы (9) она преобразовывалась к виду:

$$Q_{80\%} = b_1 A + b_2 (AA_{03}), \tag{10}$$

где $b_2 = b_1 c$.

Параметры b_1 и b_2 находились как коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии $Q_{80\%} = f(A, AA_{03})$ при нулевом свободном члене. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры уравнения множественной линейной регрессии для зависимости (10)

| Коэффициент | | | Стандартная ошибка | | | $\frac{R}{\sigma_R}$ | $\frac{b_1}{\sigma_{b_1}}$ | $\frac{b_2}{\sigma_{b_2}}$ |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| корреляции, R | регрессии | | σ_R | σ_{b_1} | σ_{b_2} | | | |
| | b_1 | b_2 | | | | | | |
| 0,98 | $1,51 \cdot 10^{-3}$ | $0,18 \cdot 10^{-3}$ | $5,76 \cdot 10^{-3}$ | $0,21 \cdot 10^{-3}$ | $0,020 \cdot 10^{-3}$ | 170 | 7,2 | 9,0 |

Из табл. 1 следует, что параметры уравнения являются надежными и удовлетворяют требованиям СП 33-101-2003:

$$\frac{|R|}{\sigma_R} > 2; \quad \frac{|b_1|}{\sigma_{b_1}} > 2; \quad \frac{|b_2|}{\sigma_{b_2}} > 2. \quad (11)$$

Переходя от параметров b_1 и b_2 к исходным параметрам, получаем:

$$Q_{80\%} = 10^{-3} 1,51A(1 + 0,12A_{03}). \quad (12)$$

Для оценки параметров формулы (6), производилось ее логарифмическое преобразование:

$$y = g + mx_1 + nx_2, \quad (13)$$

где $y = \lg(Q_{80\%})$; $g = \lg(b_1)$; $x_1 = \lg(A)$; $x_2 = \lg(1 + cA_{03})$.

Параметры g , m и n находились как коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии $y = f(x_1, x_2)$ для нескольких вариантов параметра c .

В этой ситуации наибольшие трудности связаны с выбором параметра c . Если значение c известно, то после оптимизации параметров выражения (13) переход к расчетной формуле происходит путем простого потенцирования.

Анализ показал, что если подходить формально, то в рамках конкретной выборки можно получить хорошую аппроксимацию зависимости (13) при разных значениях параметра c . На рис. 7 представлено несколько вариантов параметризации (при $c = 0,5; 0,7; 1,0; 1,5$). Графики построены для условного водосбора с площадью 1000 км^2 (в этом случае расход воды и модуль стока численно равны). Графики отражают зависимость минимального модуля стока от озерности водосбора. Помимо расчетных кривых на график нанесена осредненная кривая, полученная по фактическим данным (см. рис. 6).

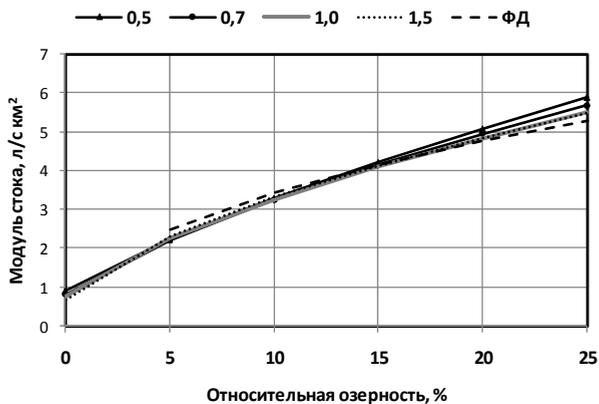


Рис. 7. Аппроксимация зависимости минимальных летне-осенних 30-суточных модулей стока 80 %-ной обеспеченности от относительной озерности водосбора для рек Карелии при различных значениях параметра c в формуле (6) и площади водосбора 1000 км^2 ; ФД – осредненная кривая, построенная по фактическим данным

Рис. 7 показывает, что при изменении параметра c в пределах рассмотренного диапазона, в средней части все кривые практически совпадают. Небольшое расхождение имеет место только на концах кривых (рис. 8). Учитывая сказанное, целесообразно принять значение $c = 1$, что существенно упрощает процедуру оптимизации параметров. В табл. 2 представлен вариант расчета параметров уравнения регрессии (13) при $c = 1$.

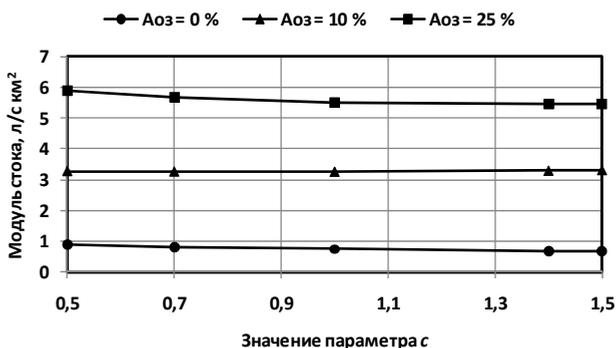


Рис. 8. Зависимость расчетного модуля минимального стока от значения параметра c в формуле (6) для водосбора 1000 км^2 при различной относительной озерности (0 %, 10 % и 25 %)

Таблица 2

Параметры уравнения множественной линейной регрессии для зависимости (13) при $c = 1$

| Коэффициенты | | | Стандартная ошибка | | | | $\frac{R}{\sigma_R}$ | $\frac{m}{\sigma_m}$ | $\frac{n}{\sigma_n}$ | $\frac{g}{\sigma_g}$ | |
|--------------|-----------|------|--------------------|------------|------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----|
| R | регрессии | | σ_R | σ_m | σ_n | σ_g | | | | | |
| | m | n | | | | | g | | | | |
| 0,94 | 0,97 | 0,61 | -3,03 | 0,0178 | 0,066 | 0,084 | 0,180 | 53 | 15 | 7,3 | -17 |

Как видно из табл. 2, параметры уравнения являются надежными и удовлетворяют требованиям СП 33-101-2003. Используя полученные параметры, после потенцирования выражения (13) получаем:

$$Q_{80\%} = 10^{-3} 0,93 A^{0,97} (1 + A_{оз})^{0,61} . \quad (14)$$

Таким образом, для территории Карелии получены две формулы – формула (12) и формула (14). Формула (12) предполагает линейную зависимость минимальных расходов воды как от площади водосбора, так и от озерности водосбора. Формула (14) предполагает, что связь с этими характеристиками является нелинейной.

Для сравнения полученных формул рассчитывались их относительные погрешности. Кроме того, рассчитывалась погрешность формулы (1) без введения поправки на озерность бассейна; параметры b , m и A_1 приняты по таблицам СНиП 2.01.14-83 [Пособие, 1984] для района № 1 (см. рис.4): $b = 2$, $m = 1$, $A_1 = 0$. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Относительные погрешности формул для расчета минимальных летне-осенних 30-суточных расходов воды 80 %-ной обеспеченности для рек Карелии, %

| Относительная погрешность | СНиП 2.01.14-83 (формула № 1) | Формула № 12 | Формула № 14 |
|---------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| Средняя | 50 | 39 | 33 |
| Максимальная | 381 | 285 | 160 |

Из табл. 3 следует, что наименьшая погрешность у формулы (14), которую и можно рекомендовать в качестве основной расчетной формулы. На рис. 9 представлен график связи фактических и рассчитанных по формуле (14) минимальных расходов воды. На графике практически отсутствует смещенность, а точки равномерно лежат относительно биссектрисы, как в верхней, так и в нижней части графика.

Погрешность 33 % для минимального стока можно считать удовлетворительной, тем более что ошибки, превышающие 100 %, зафиксированы только в 2 случаях из 48. При этом наибольшие относительные погрешности имеют место на самых малых реках, где абсолютная ошибка расчета соизмерима с расчетным минимумом, когда он составляет несколько десятых или даже сотых м³/с.

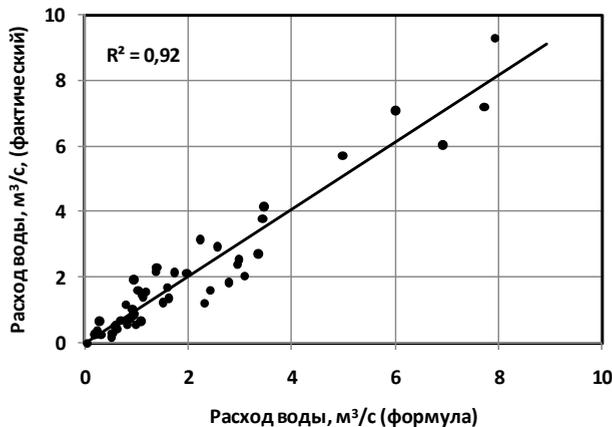


Рис. 9. График связи фактических и рассчитанных по формуле (14) минимальных 30-суточных летне-осенних расходов воды для рек Карелии

Учитывая, что формула (14) достаточно хорошо аппроксимирует эмпирические данные, с ее помощью можно более детально проанализировать влияние площади водосбора и относительной озерности на минимальный летне-осенний сток Карелии. На рис. 10 и 11 показаны такие графики.

Как видно на рис. 10, при неизменной озерности водосборов минимальный расход на реках Карелии практически линейно зависит от площади водосбора. Или говоря другими словами, водосборы с одинаковой озерностью имеют примерно одинаковые модули минимального стока.

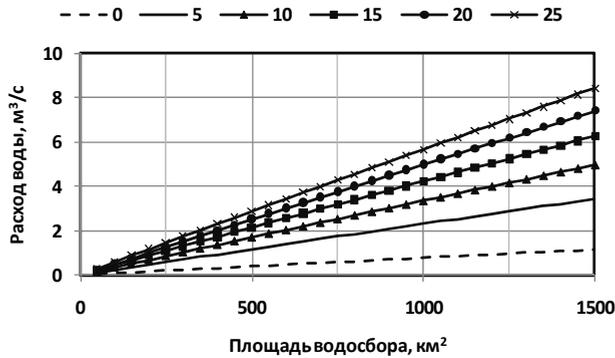


Рис. 10. Зависимость минимальных летне-осенних 30-суточных расходов воды 80 %-ной обеспеченности от площади водосбора при различных значениях относительной озерности (аппроксимация по формуле (14) для рек Карелии)

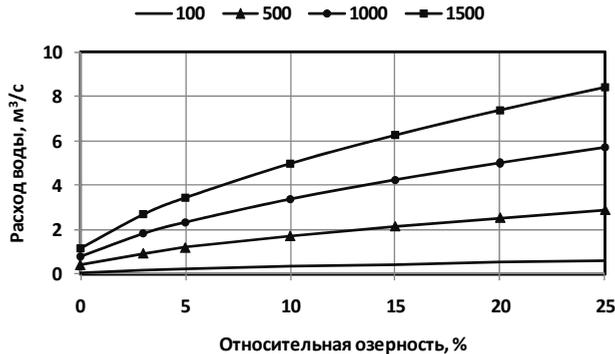


Рис. 11. Зависимость минимальных летне-осенних 30-суточных расходов воды 80 %-ной обеспеченности от величины относительной озерности при различных значениях площади водосбора (аппроксимация по формуле (14) для рек Карелии)

Анализ графика на рис. 11 показывает, что для рек с равными площадями водосборов при увеличении озерности от 3 до 15 % минимальный расход увеличивается в 2,3 раза, а при увеличении озерности от 3 до 25 % расход увеличивается в 3 раза.

Подводя итог проделанной работе, можно констатировать, что при расчетах минимального стока малых рек целесообразно использовать формулу (6) при $c = 1$:

$$Q_{80\%} = b_1 A^m (1 + A_{03})^n . \quad (15)$$

Формула в общем случае позволяет отразить нелинейный характер зависимости минимальных расходов воды от площади водосбора и относительной озерности. При этом она содержит оптимальное число параметров (три) и позволяет достаточно просто выполнить параметризацию по эмпирическим данным.

Если зависимость минимальных расходов от площади водосбора и относительной озерности близка к линейной, допустимо использовать более простую двухпараметрическую формулу (9).

Литература

1. *Владимиров А.М.* Минимальный сток рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 214 с.
2. *Владимиров А.М.* Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 368 с.
3. *Горошков И.Ф., Сакович В.М.* Влияние озер на минимальный летне-осенний сток. Вопросы гидрологических расчетов и охраны природных вод // Межведомственный сборник научных трудов. Вып. 94. – Л.: изд. ЛПИ, 1986, с. 10–15.
4. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Стройиздат, 2004. – 72 с.
5. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
6. *Сакович В.М.* Расчет минимального летне-осеннего стока рек Северо-Запада и Карелии. Вопросы экологии и гидрологические расчеты. Сборник научных трудов (межведомственный). Вып. 116. – СПб.: изд. РГГМИ, 1994, с. 63–70.
7. *Сикан А.В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.