

УДК 556.5

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА НЕИЗУЧЕННЫХ РЕКАХ БАССЕЙНА РЕКИ АНАДЫРЬ

Ушаков М. В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия

E-mail: mvilorich@narod.ru

Для безопасного пропуска весеннего половодья и рационального использования водных ресурсов в практике гидрологических расчетов необходимо определение расчетных характеристик весеннего половодья. Цель настоящей работы: получить методику для определения слоя стока и максимальных расходов воды за период весеннего половодья различной обеспеченности на неизученных реках в бассейне р. Анадыря. Исследуемый район крайне плохо изучен в гидрологическом отношении. В ходе исследования выявлены хорошие статистические связи характеристик весеннего половодья с площадью водосбора. На основе этих связей для неизученных рек Анадырского бассейна получены простые расчетные формулы для определения слоев стока и максимальных расходов воды за период весеннего половодья различной обеспеченности. Средняя относительная ошибка расчета слоев стока составила 10,7 %, а ошибка определения максимумов — 11,5 %.

Ключевые слова: весеннее половодье, слой стока, расход воды, кривая обеспеченности

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения гидроэкологических рисков, связанных с прохождением весеннего половодья необходимы надежные и простые методики гидрологических расчетов. В задачах расчетов характеристик речного стока важное место занимает определение слоя стока и максимальных расходов воды за период весеннего половодья различной обеспеченности на неизученных реках.

Объект исследования — бассейн р. Анадыря.

Предмет исследования — слой стока и максимальные расходы воды за период весеннего половодья.

Цель настоящей работы: получить расчетные формулы для определения слоя стока и максимальных расходов воды за период весеннего половодья различной обеспеченности на неизученных реках бассейна р. Анадыря.

Река Анадырь является крупнейшим водотоком Чукотского автономного округа, ее длина составляет 1150 км, площадь водосбора — 191 000 км² [1]. Реки бассейна имеют судоходное и рыболовное значение, речные воды могут рассматриваться как гидроэнергетический ресурс. Характерной особенностью водосбора является суровый климат, широкое распространение многолетней мерзлоты [2; 3; 4].

За июнь–июль–сентябрь протекает основная масса воды (94–99%) [1]. В зимние месяцы сток незначителен. На реках ежегодно формируется высокое весеннее половодье, формирующееся главным образом талыми водами. В среднем за год наблюдается от одного до четырех дождевых паводков. Наименьшие расходы

наблюдаются преимущественно во второй половине лета и осенью. Минимальные зимние расходы наблюдаются в апреле — начале мая.

Рассматриваемый район в гидрологическом отношении крайне плохо изучен, как по плотности сети, так и по продолжительности наблюдений [5]. Регулярные наблюдения за речным стоком в бассейне р. Анадырь велись всего лишь в течении 10–39 лет. В 1997 г. из-за экономического кризиса в стране наблюдения, к великому сожалению, были прекращены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многолетние наблюдения за стоком в бассейне р. Анадырь велись на 11 гидрологических постах Колымского УГМС. На пяти гидростворах измерения расходов воды производилось аэрометодом [6]. Ряды слоев стока за период весеннего половодья были выписаны из [7] и Гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра. Пропуски в рядах восстанавливались методом гидрологической аналогии.

Статистические параметры рядов определялись методом моментов с введением соответствующих поправок на смещенность оценок [8]. Однородность рядов проверялась по критериям Стьюдента и Фишера с уровнем значимости 5%. Для аналитической аппроксимации эмпирических кривых обеспеченности использовалось трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого и Менкеля [9]. Соотношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации определялось по наилучшему соответствию эмпирической и теоретической кривых обеспеченности с использованием критерия $\rho\omega^2$ [10].

Таблица 1.
Статистические параметры рядов слоев стока за период весеннего половодья

Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Длина ряда, лет	Среднее, мм	C_v	C_s/C_v	$r(1)$
1	2	3	4	5	6	7
р. Анадырь – с. Ламутское	16 400	39	161	0,3	2,5	0,01
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	47 300	39	177	0,31	2,5	0,01
р. Анадырь – с. Снежное	106 000	39	191	0,26	1,5	0,01
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	156 000	11	164	0,29	0	0
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	8 360	10	183	0,35	0	0,03

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА
НЕИЗУЧЕННЫХ РЕКАХ БАССЕЙНА РЕКИ АНАДЫРЬ**

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7
р. Куйвиеем – с. Чуванское	523	27	235	0,25	0	0,01
р. Майн – с. Ваеги	18 600	12	162	0,2	3,5	0
руч. Совхозный – с. Снежное	13,2	29	282	0,4	4	0,02
р. Энмываам – гм.ст. Энмувеем	11 400	32	165	0,39	2	0
р. Танюрер – гм.ст. Танюрер	18 500	9	212	0,44	1	0
р. Ягодный – пос. Тамватней	12,1	12	286	0,28	1	0

Примечания: C_v — коэффициент вариации; C_s — коэффициент асимметрии; $r(1)$ — коэффициент корреляции смежных лет.

Таблица 2.

Статистические параметры рядов максимальных расходов весеннего половодья

Река - пункт	Площадь водосбора, $км^2$	Длина ряда, лет	Среднее, $м^3/с$	C_v	C_s/C_v	$r(1)$
р. Анадырь – с. Ламутское	16 400	13	2 080	0,40	0	0
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	47 300	39	5 980	0,27	2	0
р. Анадырь – с. Снежное	106 000	36	6 930	0,21	1	0,01
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	156 000	14	9 930	0,27	0	0
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	8 360	13	1 150	0,43	5	0,08
р. Куйвиеем – с. Чуванское	523	27	178	0,42	1,5	0
р. Майн – с. Ваеги	18 600	16	2 140	0,27	3	0
руч. Совхозный – с. Снежное	13,2	32	6,17	0,38	1,5	0
р. Энмываам – гм.ст. Энмувеем	11 400	33	1 750	0,40	2	0
р. Танрер – гм.ст. Танюрер	18 500	33	2 870	0,28	0	0,05
р. Ягодный – пос. Тамватней	12,1	13	5,81	0,23	2,5	0

Нормативный документ [8] для определения расчетных характеристик половодья на неизученных реках рекомендует пользоваться громоздкими формулами с эмпирическими коэффициентами, определяемыми по опорной гидрологической сети, что крайне неудобно. К тому же слой стока за половодья в бассейне р. Анадыря невозможно интерполировать из-за отсутствия какой-либо закономерности в пространственном распределении.

Поэтому в данной работе отыскивались связи статистических параметров весеннего половодья с морфометрическими характеристиками водосборов (площадь, средняя высота, средний уклон бассейна, средний и средневзвешенный уклоны реки).

Расчет и построение кривых обеспеченности производились при помощи пакета компьютерных программ Hydrocal, разработанной автором, когда он еще работал в Колымском УГМС.

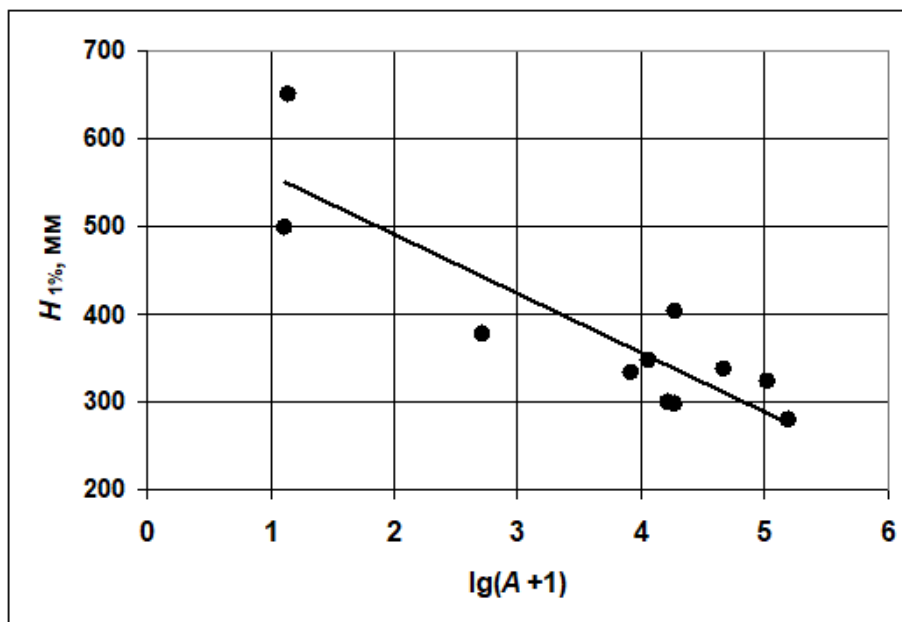
Корреляционные связи строились в табличном редакторе Microsoft Excel.

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ИХ ТОЧНОСТЬ

Слой стока за период половодья обеспеченностью 1% хорошо связан десятичным логарифмом площади водосбора (рис. 1)

$$H_{1\%} = 626 - 67,3 \lg(A + 1), \quad r = 0,89, \quad (1)$$

$H_{1\%}$ — слой стока за период половодья обеспеченностью 1%, мм; A — площадь водосбора, км²; r — коэффициент корреляции.



МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА НЕИЗУЧЕННЫХ РЕКАХ БАССЕЙНА РЕКИ АНАДЫРЬ

Рис. 1. Редукция слоя стока за период весеннего половодья обеспеченностью 1% ($H_{1\%}$) по площади водосбора (A).

Редукция модуля и слоя стока давно известна [11] и объяснена.

Для перехода от слоя стока обеспеченностью 1% ($H_{1\%}$) к слоям стока других вероятностей превышения ($H_{P\%}$) можно воспользоваться средними по водосбору переходными коэффициентами $\lambda_{P\%}$ (последняя строка в табл. 3).

Таблица 3.

Коэффициенты перехода $\lambda_{P\%}$ от $H_{1\%}$ к $H_{P\%}$

Река – пункт	Вероятность превышения P , %						
	0,1	0,5	1	3	5	10	25
р. Анадырь – с. Ламутское	1,22	1,07	1,00	0,89	0,83	0,75	0,64
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	1,23	1,07	1,00	0,88	0,83	0,74	0,62
р. Анадырь – с. Снежное	1,16	1,05	1,00	0,91	0,87	0,80	0,69
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	1,12	1,05	1,00	0,92	0,88	0,81	0,71
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	1,14	1,05	1,00	0,92	0,87	0,71	0,68
р. Куйвиеем – с. Чуванское	1,11	1,04	1,00	0,93	0,89	0,82	0,73
р. Майн – с. Ваеги	1,15	1,04	1,00	0,92	0,88	0,82	0,73
руч. Совхозный – с. Снежное	1,42	1,13	1,00	0,84	0,76	0,65	0,52
р. Энмываам – гм.ст. Энмувеем	1,24	1,07	1,00	0,87	0,81	0,72	0,58
р. Танюрер – гм.ст. Танюрер	1,15	1,05	1,00	0,91	0,86	0,78	0,64
р. Ягодный – пос. Тамватней	1,15	1,05	1,00	0,91	0,87	0,81	0,69
Среднее по водосбору	1,19	1,06	1,00	0,90	0,85	0,77	0,66

Средняя относительная ошибка расчета слоя стока за период весеннего половодья вероятностью превышения 1% составляет 10,7 % (табл. 4).

Надо заметить, что связи характеристик стока с размерами водосбора успешно использовались в работах [12, 13].

Максимальные расходы воды весеннего половодья тоже хорошо связаны с площадью водосбора (рис. 2)

$$Q_{1\%}^{0,1} = 0,336 \lg(A+1) + 0,889, \quad r = 0,997. \quad (2)$$

Таблица 4.
Сравнение расчетных слоев стока обеспеченностью 1 % со слоями, определенными по натурным данным

Река – пункт	Слой стока $H_{1\%}$, мм		Ошибка, мм	Относительная ошибка, %
	по натурным данным	по формуле (1)		
р. Анадырь – с. Ламутское	299	342	43	14,5
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	338	311	-27	-7,9
р. Анадырь – с. Снежное	323	288	-35	-10,9
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	279	277	-2	-0,9
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	334	362	28	8,4
р. Куйвиеем – с. Чуванское	377	443	66	17,5
р. Майн – с. Ваеги	298	339	41	13,6
руч. Совхозный – с. Снежное	651	548	-103	-15,8
р. Энмываам – гм.ст. Энмывеем	348	353	5	1,4
р. Танрер – гм. ст. Танюрер	404	339	-65	-16,1
р. Ягодный – пос. Тамватней	498	551	53	10,6

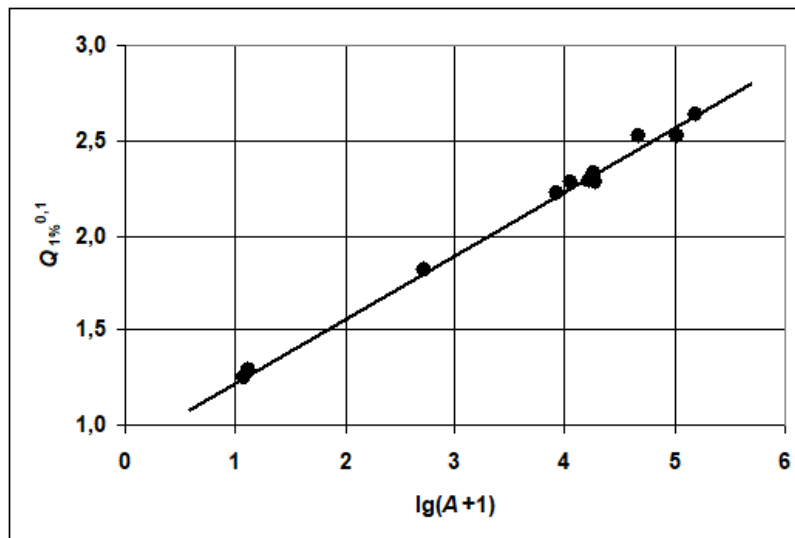


Рис. 2. Связь максимальных расходов воды весеннего половодья с площадью водосбора.

Преобразовав уравнение (2), получаем расчетную формулу

$$Q_{1\%} = (0,336 \lg(A+1) + 0,889)^{10}. \quad (3)$$

О точности формулы (3) можно судить по табл. 5, средняя относительная ошибка составила 11,5%.

Таблица 5.

Сравнение расчетных максимальных расходов воды обеспеченностью 1% с расходами, определенными по натурным данным

Река – пункт	Расход воды $Q_{1\%}$, м ³ /с		Ошибка, м ³ /с	Относительная ошибка, %
	по натурным данным	по формуле (3)		
1	2	3	4	5
р. Анадырь – с. Ламутское	3 880	4 222	342	16,5
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	10 400	8 080	-2 320	-22,3
р. Анадырь – с. Снежное	10 500	12 897	2 397	22,8

Продолжение таблицы 5.

1	2	3	4	5
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	16 100	16 013	-87	-0,5
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	2 900	2 730	-170	-5,8
р. Куйвиеем – с. Чуванское	386	361	-25	-6,5
р. Майн – с. Ваеги	3 840	4 571	731	19,0
руч. Совхозный – с. Снежное	12,6	11,4	-1,2	-9,4
р. Энмываам – гм.ст. Эньмувеем	3 780	3 345	-435	-11,5
р. Танрер – гм.ст. Танюрер	4 690	4 555	-135	-2,9
р. Ягодный – пос. Тамватней	9,55	10,4	0,85	8,9

Для перехода от расхода обеспеченностью 1 % ($Q_{1\%}$) к расходам других вероятностей превышения ($Q_{P\%}$) также были рассчитаны средние по водосбору коэффициентами $\lambda_{P\%}$ (последняя строка в табл. 6).

Таблица 6.

Коэффициенты перехода $\lambda_{P\%}$ от $Q_{1\%}$ к $Q_{P\%}$

Река – пункт	Вероятность превышения P , %						
	0,1	0,5	1	3	5	10	25
1	2	3	4	5	6	7	8
р. Анадырь – с. Ламутское	1,22	1,07	1,00	0,89	0,83	0,75	0,64
р. Анадырь – пос. Новый Еропол	1,23	1,07	1,00	0,88	0,83	0,74	0,62
р. Анадырь – с. Снежное	1,16	1,05	1,00	0,91	0,87	0,80	0,69
р. Анадырь – в 3,0 км выше устья р. Утесики	1,12	1,05	1,00	0,92	0,88	0,81	0,71
р. Еропол – с. Чуванское (6,0 км ниже)	1,14	1,05	1,00	0,92	0,87	0,71	0,68
р. Куйвиеем – с. Чуванское	1,11	1,04	1,00	0,93	0,89	0,82	0,73
р. Майн – с. Ваеги	1,15	1,04	1,00	0,92	0,88	0,82	0,73

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА НЕИЗУЧЕННЫХ РЕКАХ БАСЕЙНА РЕКИ АНАДЫРЬ

Продолжение таблицы 6.

руч. Совхозный – с. Снежное	1,42	1,13	1,00	0,84	0,76	0,65	0,52
р. Энмываам – гм.ст. Энмувеем	1,24	1,07	1,00	0,87	0,81	0,72	0,58
р. Танюрер – гм.ст. Танюрер	1,15	1,05	1,00	0,91	0,86	0,78	0,64
р. Ягодный – пос. Тамватней	1,15	1,05	1,00	0,91	0,87	0,81	0,69
Среднее по водосбору	1,19	1,06	1,00	0,90	0,85	0,77	0,66

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены тесные статистические связи характеристик весеннего половодья с площадью водосбора. На основе этих связей для неизученных рек бассейна р. Анадыря получены расчетные формулы для определения слоев стока и максимальных расходов воды за период весеннего половодья различной обеспеченности.

Верификация полученной методики показала, что средняя относительная ошибка расчета слоев стока составила 10,7%, а ошибка определения максимумов — 11,5%.

Список литературы

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 282 с.
2. Калабин А.И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР // Труды ВНИИ-1. Том 18. Магадан: Изд-во Магаданского научно-исследовательского института золота и редких металлов (ВНИИ-1), 1960. 469 с.
3. Север Дальнего Востока / под ред. Н. А. Шилов. М.: Наука, 1970. 487 с.
4. Геоэкология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 516 с.
5. Ушаков М.В. О сокращении стационарной гидрологической сети на Северо-Востоке России / Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В. В. Никонова (Апатиты, 16-22 июня 2019 г.). С. 172–173.
6. Лучшева А. А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 423 с.
7. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I, вып. 17. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 429 с.
8. Свод правил 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 74 с.
9. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчеты речного стока. Л.: Госстройиздат, 1934. 259 с.
10. Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 239 с.
11. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеоиздат, 1959. 527 с.
12. Комлев А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 163 с.
13. Ушаков М. В. Формулы для расчета годового стока неизученных рек Примагаданья // Общество. Среда. Развитие. 2019. № 2. С. 73–76.

**METHODOLOGY FOR CALCULATION OF SPRING FLOOD
CHARACTERISTICS ON UNSTUDIED RIVERS OF
THE ANADYR RIVER BASIN**

Ushakov M. V.

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute N. A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: mvilorich@narod.ru

To reduce the hydroecological risks associated with the passage of the spring flood, reliable and simple methods of hydrological calculations are necessary. In the tasks of calculating the characteristics of river flow, an important place is occupied by determining the flow layer and the maximum water consumption during the spring flood of various security on unexplored rivers.

For safe passage of spring floods and rational use of water resources in the practice of hydrological calculations, it is necessary to determine the design characteristics of spring floods. The purpose of this work is to obtain a methodology for determining the runoff layer and maximum water discharge for the period of spring floods of various probabilities of exceeding on unexplored rivers in the Anadyr river basin. The area under study is extremely poorly studied hydrologically. The study revealed good statistical relationships between the characteristics of spring floods and the catchment area. On the basis of these relationships for the unexplored rivers of the Anadyr basin, simple calculation formulas were obtained to determine the runoff layers and the maximum water discharge for the period of spring floods of various probability of exceeding. The average relative error in calculating runoff layers was 10.7%, and the error in determining the maximums was 11.5%.

Close statistical relationships between the characteristics of the spring flood and the catchment area are revealed. On the basis of these relationships, for unexplored rivers of the Anadyr River basin, calculation formulas for determining runoff layers and maximum water flow rates for the period of spring high water of various availability are obtained.

Keywords: spring flood, runoff layer, water discharge, excess probability curve.

References

1. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Tom 19. Severo-Vostok (Resources of surface waters of the USSR. vol. 19. Northeast). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1969. 282 p. (in Russian).
2. Kalabin A. I. Vechnaja merzlota i gidrogeologija Severo-Vostoka SSSR (Permafrost and hydrogeology of the North-East of the USSR), Proceedings of VNII-1. vol. 18. Magadan: Publishing House of the Magadan Research Institute of Gold and Rare Metals (VNII-1), 1960. 469 p. (in Russian).
3. Sever Dal'nego Vostoka (North of the Far East). Ed. N.A. Shilo. Moscow: Nauka (Publ.), 1970. 487 p. (in Russian).
4. Geokriologija SSSR. Vostochnaja Sibir' i Dal'nij Vostok (Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East). Ed. Je.D. Ershov. Moscow: Nedra (Publ.), 1989. 516 p. (in Russian).
5. Ushakov M. V. On the reduction of the stationary hydrological network in the North-East of Russia, in *Jekologicheskie problemy severnyh regionov i puti ih reshenija* (Environmental problems of the northern

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА НЕИЗУЧЕННЫХ РЕКАХ БАССЕЙНА РЕКИ АНАДЫРЬ

- regions and ways to solve them). VII All-Russian Conf. For professor V. V. Nikonov 75 anniversary. Apatity, 2019, pp. 172–173.
6. Luchsheva A. A. Prakticheskaja gidrometrija (Practical hydrometry). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1983. 423 p. (in Russian).
 7. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod [Long-term data on the regime and resources of surface waters. vol. I, ussue 17. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1985. 429 p. (in Russian).
 8. Svod pravil 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik (Code of Practice 33-101-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristic). Moscow: Gosstroj Rossii, 2004. 74 p. (in Russian).
 9. Krickij S. N., Menkel' M. F. Raschety rechnogo stoka (River flow calculations). Leningrad: Gosstrojizdat (Publ.), 1934. 259 p. (in Russian).
 10. SHelutko V. A. CHislennye metody v gidrologii (Numerical methods in hydrology). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1991. 239 p. (in Russian).
 11. Sokolovskij D.L. Rechnoj stok (River runoff). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1959. 527 p. (in Russian).
 12. Komlev A. M. Zakonomernosti formirovaniya i metody raschetov rechnogo stoka (Regularities of formation and methods of calculating river flow). Perm': Izd-vo Perm. un-ta, 2002, 163 p. (in Russian).
 13. Ushakov M. V. Formuly dlya rascheta godovogo stoka neizuchennyh rek Primagadan'ya (Formulas for calculating the annual runoff of unexplored rivers of Primagadanya). Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2019, no. 2, pp. 73–76. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.12.2020