



УДК 556.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕННЕ-ЗИМНЕГО СТОКА РЕК
БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ КОЛЫМЫ**
**MODELING OF THE AUTUMN-WINTER FLOW OF THE RIVERS
OF THE UPPER KOLYMA RIVER BASIN**

М.В. Ушаков
M.V. Ushakov

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 685000, г. Магадан, ул. Портовая, 16

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after N.A. Shilo, Far East Branch of
Russian Academy of Sciences, 16 Portovaya St, Magadan, 685000, Russia

E-mail: mvilorich@narod.ru

Аннотация

В работе ставится цель получить математические модели, описывающие гидрографы стока рек Верхней Колымы в осенне-зимнюю межень. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: подобрать функции, аппроксимирующие кривые истощения осенне-зимнего стока; установить связи параметров этих функций с гидрометеорологическими и другими факторами; проверить адекватность математической модели на независимом материале, то есть на данных, которые не участвовали при выводе расчетных формул. Истощение осенне-зимнего стока промерзающих рек происходит по показательной функции. Параметры уравнения гидрографа связаны со средним уклоном реки. Пользуясь полученными формулами, можно предвычислять ежедневные расходы воды любой непромерзающей реки Верхней Колымы с середины октября до середины апреля. Кривые истощения стока промерзающих рек хорошо аппроксимируются логарифмической функцией. Параметры функции связаны с расходом воды на 1 октября, средней температурой воздуха за июнь-сентябрь, минимальным 30-суточным расходом воды за летне-осенний период обеспеченностью 95%. Полученная формула позволяет предвычислять ежедневные расходы воды любой неизученной промерзающей реки с 1 октября до даты промерзания.

Abstract

The aim of the research is to obtain a mathematical model of the Upper Kolyma streamflow recession in autumn and winter low flow period. Development of the recession curves was divided into several tasks: selecting the functions approximating the autumn-winter streamflow recession curves, establishing the relationships between the parameter of these functions with hydrometeorological and other factors, verifying the adequacy of the mathematical model on independent data, i.e. the data not involved in deriving design equations. It was found out that the autumn-winter streamflow recession of freezing-up rivers occurs at an exponential function. The hydrograph equation parameters are related to an average river slope. Using the obtained equations it would be possible to forecast daily discharges of any Upper Kolyma non-frozen river from mid-October to mid-April. The streamflow recession curves of freezing-up rivers are well approximated with the help of the logarithmic function. The parameters of the function are related to water flow on the October 1, the average air temperature in June-September period, minimal 30-day discharge in summer-autumn period with 95 percent exceedance probability. The obtained equation allows forecasting of the daily water discharge of any ungauged freezing-up river from October 1 until its complete freezing date.



Ключевые слова: речной сток, межень, расход воды, гидрограф, уклон реки, температура воздуха, аппроксимация.

Keywords: recession curve, low flows, water discharge, hydrograph, river slope, air temperature, approximation.

Введение

Для планирования хозяйственного использования водных ресурсов, прогнозов и расчетов речного стока в осенне-зимнюю межень и ряда других целей полезны знания о закономерностях истощения речного стока той или иной территории. В горных районах криолитозоны эти знания распространяются на зону активного водообмена, подземные воды которой участвуют в питании рек. В период зимней межени отсутствует поступление атмосферных вод, вод таяния ледников, снежников, наледей и гольцового льда, поверхностный сток в реках обеспечивается притоком озерных и подземных надмерзлотных вод, а в отдельных случаях и подмерзлотных [Глотов, Глотова, 2010].

Известно, что в криолитозоне гидрограф меженного стока отражает гидрогеологические особенности водосбора [McNamara et al., 1997; Глотов, Глотова, 2010; Ming-Ko Woo, 2012]. В данной работе ставится цель получить математические модели истощения стока рек Верхней Колымы в осенне-зимнюю межень. Под Верхней Колымой понимается бассейн р. Колымы до административной границы Магаданской области с Республикой Саха (Якутия). Водосборная площадь рассматриваемой территории равна 234000 км². Примерно 1.5% площади занято межгорными впадинами, около 0.2% – непромерзающими озерами. Характерной особенностью рассматриваемой территории является холодный климат [Север, 1970; Климатические параметры ..., 1979; Научно-прикладной справочник ..., 1990]. Многолетнемерзлые породы распространены повсеместно, в долинах водотоков образовались сквозные гидрогенные и гидрогеогенные талики, суммарная площадь которых не более 1500 км², или менее 1% площади Верхней Колымы, что позволяет считать криолитозону сплошной [Калабин, 1960; Геокриология, 1989].

Внутригодовое распределение стока рек отличается значительной неравномерностью. В теплую часть года (май–октябрь) протекает основная масса воды (94–99%), в зимние месяцы сток незначителен или вовсе отсутствует [Ресурсы поверхностных вод ..., 1969].

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: подобрать функции, аппроксимирующие кривые истощения осенне-зимнего стока, установить связи параметров этих функций с гидрометеорологическими и другими факторами, проверить адекватность математической модели на независимом материале, то есть на данных, которые не участвовали при выводе расчетных формул.

Идея использования представлений о кривых истощения стока, развитая в настоящей статье, не нова: данные исследования подробно описаны в работах А.М. Владимирова [1970, 1976], С.К. Аржаковой [1995, 2001].

Данная работа является продолжением исследований, опубликованных М.В. Ушаковым [2016а, 2016б]. До этих работ вопросы кривых истощения меженного стока рек Верхней Колымы никем глубоко не прорабатывались.

Материалы и методы исследования

Данные о речном стоке взяты в справочнике [Многолетние данные ..., 1985] и из Фондовых материалов ФГБУ «Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» за 1981–2010 гг. Длина рядов стока, которые



использовались для построения модели, лежит в пределах 29–47 лет (точнее будет сказать зим), что достаточно для решения поставленных задач.

Данные о среднемесячных температурах воздуха за июнь–сентябрь 1961–1980 гг. в г. Сусумане взяты на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [ВНИИГМИ-МЦД, 2016].

Аналитические аппроксимации гидрографов стока проводились методом наименьших квадратов.

Кривые истощения стока непромерзающих рек в осенне-зимний период хорошо аппроксимируются показательной функцией:

$$Q_i / Q_{15} = ai^b, \quad (1)$$

где i – порядковый номер дня, начиная с 1 октября; Q_i – расход воды в день i , м³/с; Q_{15} – расход воды на 15 октября, м³/с; a и b – параметры аппроксимирующей функции.

Для выявления особенностей истощения осенне-зимнего стока промерзающих рек Верхней Колымы были выбраны гидрографы стока на шести ручьях за период 1961–1980 гг. Кривые истощения осенне-зимнего стока в относительных координатах хорошо аппроксимируются логарифмической функцией:

$$Q_i / Q_1 = a \ln(i / D), \quad (2)$$

где Q_i – расход воды в день i , л/с; i – номер дня, начиная с 1 октября; Q_1 – расход воды на 1 октября, л/с; D – дата прекращения стока (номер дня от 1 октября), a – параметр аппроксимирующей функции.

Связи параметров уравнений (1), (2) с характеристиками водосборов отыскивались при помощи регрессионного анализа.

Верификация предлагаемых моделей проводилась на независимом материале, то есть по данным гидрологических постов, которые не использовались при выводе расчетных формул.

Все расчеты и графические построения выполнялись с использованием табличного редактора Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

1. Непромерзающие реки.

По многолетним данным 10 гидрологических постов была рассчитана типовая (осредненная) кривая истощения стока в осенне-зимний период (рис. 1) в относительных ординатах:

$$q_i = 100Q_i / Q_{15} = 4190i^{-1.35}, \quad (3)$$

где множитель 100 – коэффициент перехода от долей к процентам, где i – порядковый номер дня, начиная с 1 октября; Q_i – расход воды в день i , м³/с; Q_{15} – расход воды на 15 октября, м³/с.

Как видно из рисунка 1, до середины ноября идет быстрое истощение стока, так как в связи с постепенным накоплением отрицательных температур воздуха прекращается поверхностный склоновый сток, и река переходит на питание исключительно подземными водами. По мере дальнейшего снижения температуры воздуха начинается промерзание надмерзлотных подземных вод, что и приводит к снижению речного стока.

В таблице 1 приведены параметры уравнений истощения стока вида (1) по отдельным непромерзающим рекам.

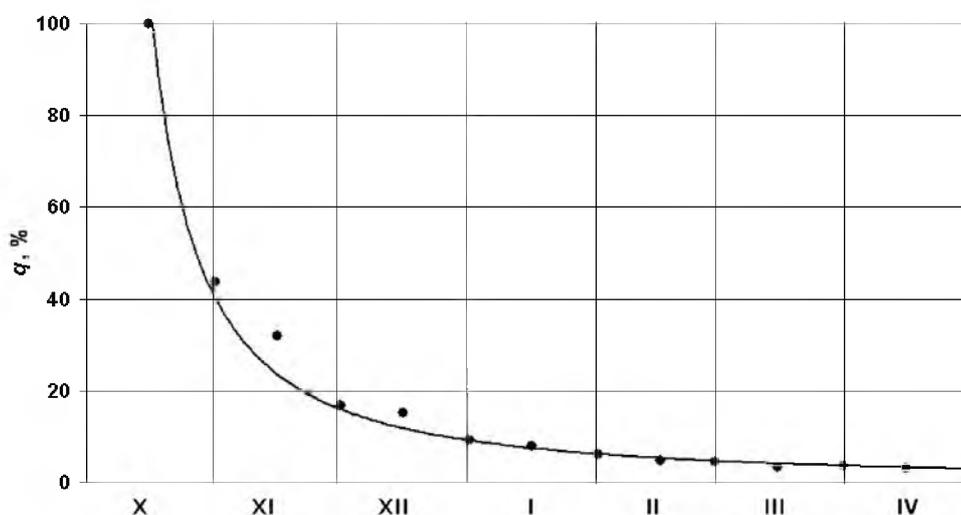


Рис. 1. Среднемноголетняя кривая истощения зимнего стока на непромерзающих реках бассейна Верхней Колымы q (%)

Fig. 1. Long-term average winter flow recession curve for the non-freezing rivers in the Upper Kolyma river basin q (%)

Таблица 1

Table 1

Параметры уравнений истощения стока непромерзающих рек бассейна Верхней Колымы
Parameters of the recession flow equations for the non-freezing rivers in the Upper Kolyma river basin

Река – створ	Площадь водосбора, км ²	Средний уклон реки, ‰	Параметры уравнения (1)	
			a	b
Колыма – Оротук	42600	1.43	5410	-1.41
Колыма – Колымская ГЭС	61500	1.19	6540	-1.47
Колыма – Усть-Среднекан	99400	1.01	4620	-1.36
Кулу – Кулу	10300	3.79	4070	-1.32
Детрин – устье Омчука	3490	3.17	2790	-1.20
Бохалча – в 4.5 км от устья	13600	2.87	5760	-1.43
Буюнда – в 3.8 км ниже устья Бурката	9090	7.10	2620	-1.18

Параметр b в (1) является обобщенным показателем гидрогеологических условий зоны активного водообмена, характеризующим гидрофизические свойства пород, слагающих сезонно талый слой и надмерзлотные талики, а также гидравлические условия протекания грунтовых вод (в частности, гидравлические уклоны). Так этот параметр связан со средним уклоном реки S (‰):

$$b = 0.040S - 1.46, \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0.58. \quad (4)$$

Чем меньше уклоны, тем, при прочих равных условиях, меньше сток подземных вод, а, следовательно, интенсивнее идет истощение речного стока.

Параметр a функционально связан с b :

$$a = 63.4 \exp(-3.15b). \quad (5)$$

Учитывая выражения (4), (5), уравнение кривой истощения стока для любой непромерзающей реки в районе Верхней Колымы можно записать следующим образом:

$$q_i = 63.4 \exp(4.47 - 0.126S) \cdot i^{0.04S-1.46}, \quad (6)$$

где i – порядковый номер дня, начиная с 1 октября; S – средний уклон реки, ‰.

Таким образом, пользуясь формулой (6), можно предвычислять ежедневные расходы воды любой непромерзающей реки Верхней Колымы с середины октября до середины апреля.

Для верификации формулы (6) по трем независимым гидрометрическим створам были выполнены расчеты расходов воды за осенне-зимний период для лет с различной водностью октября (рис. 2). Математическая модель довольно хорошо описывает кривые истощения стока, средняя относительная ошибка предвычисления среднего расхода воды за октябрь – апрель составляет 5% (табл. 2).

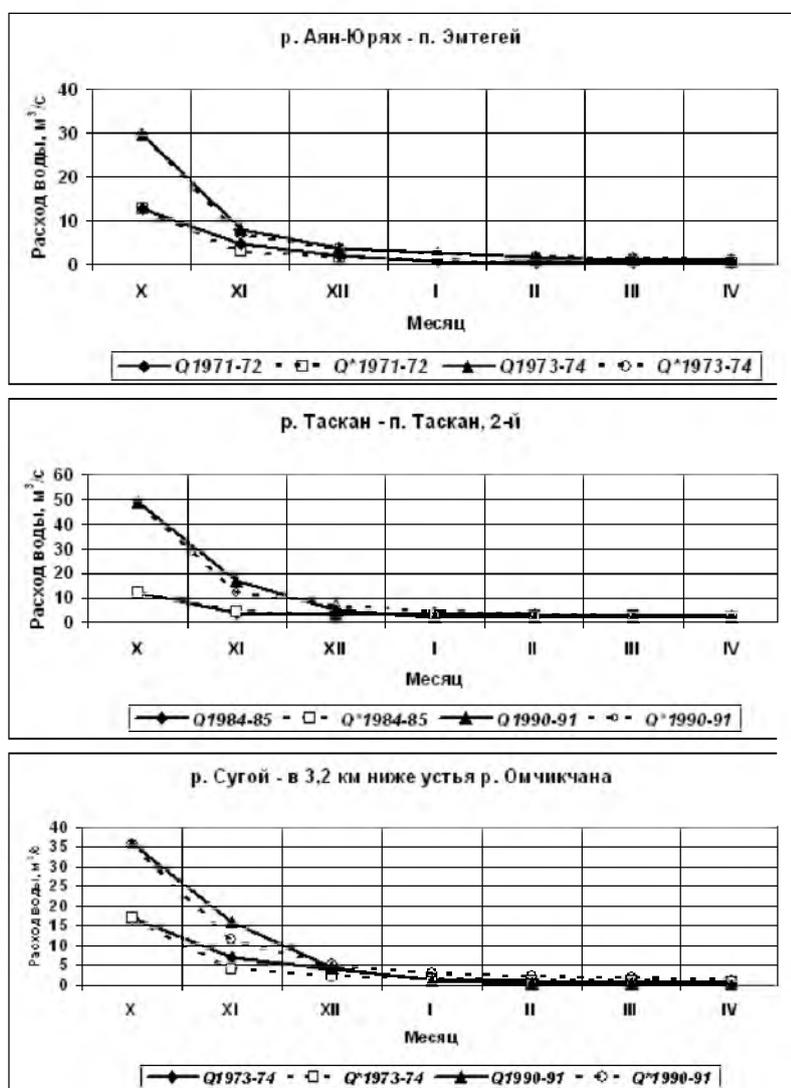


Рис. 2. Наблюдаемые (Q) и расчетные (Q*) кривые истощения стока непромерзающих рек бассейна Верхней Колымы в осенне-зимний период в годы различной водности
Fig. 2. Observed (Q) and calculated (Q*) depletion curves of nonfreezing rivers in the Upper Kolyma basin in the autumn-winter period in years of different water content



Таблица 2

Table 2

Оценка точности предвычисления среднего расхода воды непромерзающих рек бассейна Верхней Колымы за осенне-зимний период (октябрь–апрель)
 Estimation of the accuracy of the pre-calculation of the average flow rate of the non-freezing rivers in the Upper Kolyma basin during the autumn-winter period (October-April)

Река – пункт	Годы начала осенне-зимнего периода	Средние расходы воды за осенне-зимний период, м ³ /с		Относительные отклонения, %
		расчетные	наблюденные	
Аян-Юрях – Эмтегей	1971	2.83	2.98	-5.0
	1973	6.64	6.81	-2.5
Таскан – Таскан-2	1984	4.30	4.33	-0.7
	1990	11.5	11.2	2.7
Сугой – в 3.2 км ниже устья р. Омчикчана	1973	3.89	4.53	-14.1
	1990	8.54	8.14	4.9

2. Промерзающие реки.

Для выявления особенностей истощения осенне-зимнего стока промерзающих рек Верхней Колымы были выбраны гидрографы стока на шести ручьях за период 1961–1980 гг. (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Характеристики ручьев (промерзающих рек) бассейна Верхней Колымы
 Characteristics of the streams (freezing rivers) of the Upper Kolyma basin

Ручей – створ	Площадь водосбора, км ²	Среднегогодовые расходы воды на 1 октября, л/с	Минимальные 30-суточные расходы воды за летне-осенний период обеспеченностью 95 %, л/с	Средние даты прекращения стока (промерзания)
Контактный – Средний	14.2	44.6	19	24.X
Контактный – Нижний	21.2	86.7	49	31.X
Южный – устье	0.27	0.24	0.36	16.X
Встреча – выше устья р. Угрозы	5.35	9.84	14.2	24.X
Дождемерный – устье	1.43	2.21	4	23.X
Северный – лоток	0.38	0.77	1.49	20.X

Параметр a в уравнении (2) можно назвать коэффициентом истощения запасов подземных вод. Среднегогодовая дата промерзания D хорошо связана с минимальным 30-суточным расходом воды за летне-осенний период обеспеченностью 95% Q_{m95} :

$$D = 18.05Q_{m95}^{0.12}, R^2 = 0.92, \quad (7)$$

где Q_{m95} – минимальный 30-суточный расход воды за летне-осенний период обеспеченностью 95%, л/с, определяющийся по [СП 33-101-2003, 2004].



Показатель Q_{m95} является интегральным показателем запасов подземных вод в бассейне реки в летне-осенний меженный период.

В свою очередь, параметр a тесно связан со среднемноголетней датой промерзания D :

$$a = 5.22 \cdot 10^{-3} D + 0.55 - 1, R^2 = 0.92. \quad (8)$$

Таким образом, пользуясь уравнениями (2), (7), (8), можно вычислять среднемноголетние ежедневные расходы воды на неизученных водотоках с 1 октября до даты промерзания.

Для предвычисления кривых истощения стока для любого заданного года нужно учитывать сложившиеся гидрометеорологические условия к 1 октября.

Параметр a_j в год j хорошо связан с расходом воды на 1 октября Q_{1j} и средней температурой воздуха в г. Сусумане за июнь-сентябрь T_j :

$$a_j = 0.643(\lg(Q_{1j} + 1)T_j)^{0.031} - 1, R^2 = 0.60. \quad (9)$$

Даты промерзания D_j очень хорошо связаны с параметром a_j :

$$D_j = 0.0345 \exp(9.66(a_j + 1)), R^2 = 0.98. \quad (10)$$

Расход на 1 октября характеризует запасы подземных вод к началу зимы, а средняя температура воздуха за июнь-сентябрь является косвенным показателем накопленного за лето почво-грунтами тепла и глубины сезонного протаивания.

Таким образом, с учётом уравнений (9), (10) формула (3) для любого заданного года j примет вид:

$$Q_{ij} = Q_{1j} (0.643(\lg(Q_{1j} + 1)T_j)^{0.031} - 1) \ln[i / (0.0345 \exp(6.21(\lg(Q_{1j} + 1)T_j)^{0.031}))], \quad (11)$$

где i – порядковый номер дня, начиная с 1 октября; Q_{1j} – расход воды на 1 октября в год j ; T_j – средняя температура воздуха в г. Сусумане за июнь-сентябрь в год j .

Проверочные расчеты по формуле (11) на независимом материале показали, что предложенная модель адекватно предвычисляет ежедневные расходы воды (рис. 3). Абсолютные ошибки в определении дат прекращения стока составляют 2–4 дня.

Заключение

Истощение осенне-зимнего стока непромерзающих рек Верхней Колымы происходит по показательной функции. Параметры уравнения гидрографа связаны со средним уклоном реки. Пользуясь полученными формулами, можно предвычислять ежедневные расходы воды любой непромерзающей реки Верхней Колымы с середины октября до середины апреля. Проверка на независимом материале показала, что математическая модель довольно хорошо описывает кривые истощения стока, средняя относительная ошибка предвычисления среднего расхода воды за октябрь – апрель составляет 5%.

Кривые истощения стока промерзающих рек хорошо аппроксимируются логарифмической функцией. Параметры функции связаны с расходом воды на 1 октября, средней температурой воздуха за июнь-сентябрь, минимальным 30-суточным расходом воды за летне-осенний период обеспеченностью 95%. Полученная формула позволяет предвычислять ежедневные расходы воды любой неизученной промерзающей реки с 1 октября до даты промерзания. Проверочные расчеты на независимом материале показали, что абсолютные ошибки в определении дат прекращения стока составляют 2–4 дня.

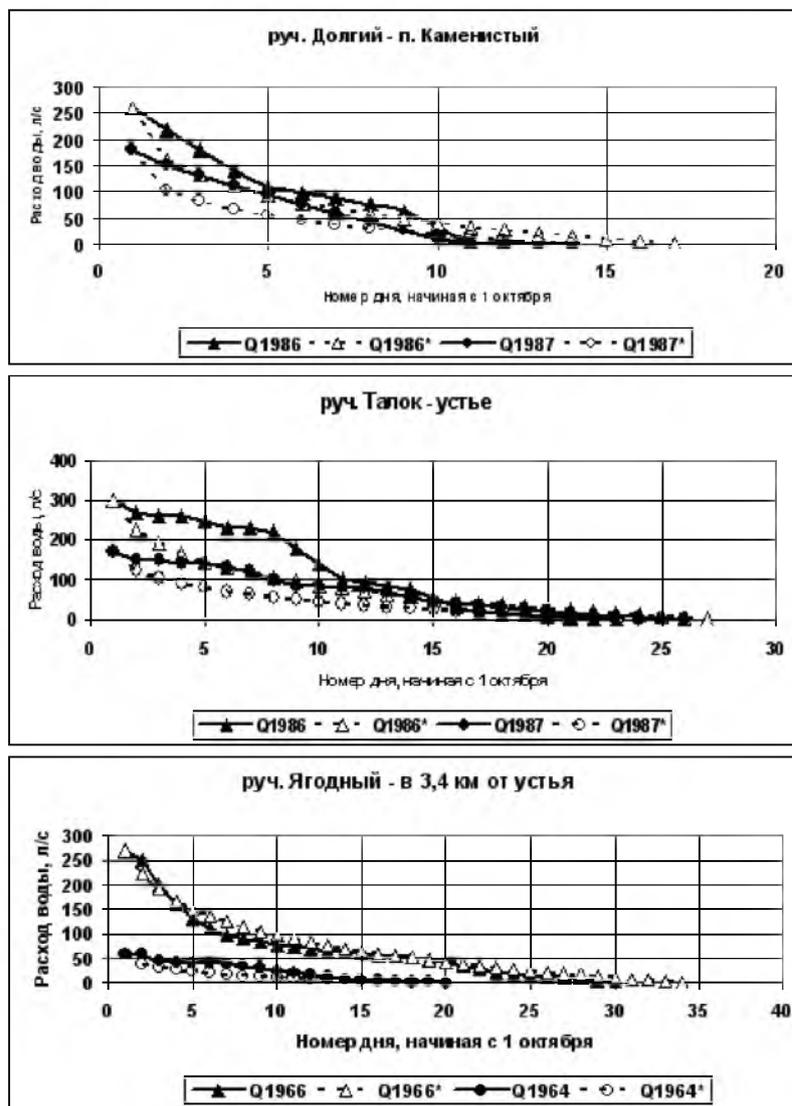


Рис. 3. Наблюденные (Q) и рассчитанные (Q^*) кривые истощения стока малых рек Верхней Колымы
 Fig. 3. Observed (Q) and calculated (Q^*) flow recession curves for the small rivers in the Upper Kolyma river basin

Благодарности

Автор выражает благодарность главному научному сотруднику Федерального государственного бюджетного учреждения науки Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, доктору геолого-минералогических наук В.Е. Готову за высказанные ценные замечания при подготовке рукописи данной статьи.

**Список литературы
References**

1. Аржакова С.К. 1995. Расчеты гидрографа зимнего стока на промерзающих реках Якутии. *В кн.: Вопросы географии Якутии. Вып. 8. Якутск:* 49–52.
 Arzhakova S.K. 1995. Calculations of the hydrograph of the winter runoff on the freezing rivers of Yakutia. *In: Voprosy geografii Yakutii [Questions of the geography of Yakutia]. Vol. 8. Yakutsk:* 49–52. (in Russian)
2. Аржакова С.К. 2001. Зимний сток рек криолитозоны России. СПб., 209.
 Arzhakova S.K. 2001. *Zimnij stok rek kriolitozony Rossii [Winter runoff of the rivers of Russia's cryolithic zone]. Saint-Petersburg,* 209. (in Russian)



3. Владимиров А.М. 1970. Минимальный сток рек СССР. Л., 214.
Vladimiriv A.M. 1970. Minimal'nyj stok rek SSSR [The minimum runoff of the USSR]. Leningrad, 214. (in Russian)
4. Владимиров А.М. 1976. Сток рек в маловодный период года. Л., 295.
Vladimiriv A.M. 1976. Stok rek v malovodnyj period goda [River flow in the low-water season]. Leningrad, 295. (in Russian)
5. ВНИИГМИ-МЦД. 2016. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 13.01.2016).
RIHMI-WDC. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (accessed 13 January 2016). (in Russian)
6. Геокриология СССР. 1989. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М., 515.
Geokriologija SSSR. 1989. Geocryology USSR. Eastern Siberia and the Far East. Moscow, – 515 s. (in Russian)
7. Глотов В.Е., Глотова Л.П. 2010. Особенности питания рек подземными водами на арктическом склоне Чукотки. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 1: 89–99.
Glotov V.E., Glotova L.P. 2010. Features feeding rivers groundwater on the Arctic slope of Chukotka. *Vestnik SVNC DVO RAN*. 1: 89–99. (in Russian)
8. Калабин А.И. 1960. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР. В кн.: Труды ВНИИ-1. Т. 18. Магадан, 469.
Kalabin A. I. 1960. Permafrost and hydrogeology of the NorthEast of the USSR. In: Trudy VNIИ-1. T. 18. Magadan, 469. (in Russian)
9. Климатические параметры Сибирского и Дальневосточного экономических районов. 1979. Л., 390.
Klimaticheskie parametry Sibirskogo i Dal'nevostochnogo jekonomicheskikh rajonov [Climatic parameters of the Siberian and Far Eastern economic regions]. 1979. Leningrad, 390. (in Russian)
10. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I, вып. 17. 1985. Л., 429.
Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod [Long-term data on the regime and resources of surface waters]. 1985. T. I. Vol. 17. Leningrad, 429. (in Russian)
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. 1990. Сер. 3. Ч. 1–6. Вып. 33. Л., 566.
Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR [Research and Applied Climate Handbook of USSR]. 1990. Ser. 3. P. 1–6. Vol. 33. Leningrad, 566. (in Russian)
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. 1969. Т. 19. Л., 282.
Resursy Poverhnostnyh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. 1969. T. 19. Leningrad, 282. (in Russian)
13. Север Дальнего Востока. 1970. М., 487.
Sever Dalnego Vostoka [North of Far East]. 1970. Moscow, 487. (in Russian)
14. СП 33-101-2003. 2004. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 74.
SP 33-101-2003. 2004. Determinancy of the main calculated of hydrological characteristics. Moscow, 74. (in Russian)
15. Ушаков М.В. 2016а. Математическая модель истощения стока рек Северного Приохотоморья в период зимней межени. *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*, 21 (1): 83–87.
Ushakov M.V. 2016a. Mathematical model of depletion runoff Northern Priohotomorja rivers during winter low. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*, 21 (1): 83–87. (in Russian)
16. Ушаков М.В. 2016б. Модель кривых истощения зимнего стока рек Северо-Востока России. *Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Естественные науки*, 3: 5–14.
Ushakov M.V. 2016b. Model curves depletion winter flow of the rivers of the North-East of Russia. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Estestvennye nauki*, 3: 5–14. (in Russian)
17. Фондовые материалы ФГБУ «Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». 1981–2010.
Stock materials of Kolyma Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. 1981–2010.
18. McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D. 1997. Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques. *Water Resources Research*, 33 (7): 1707–1720.
19. Ming-Ko Woo. 2012. Permafrost Hydrology. N.Y., Springer Science & Business Media, 564.