

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.51:556.048 (470.2)

РАСЧЕТ ИСПАРЯЕМОСТИ И СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С ВОДОСБОРОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

Ю. А. Сало, Л. Е. Назарова, А. Ф. Балаганский

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

В статье дается сравнение результатов расчета испаряемости и суммарного испарения с водосборов Северо-Запада РФ по нескольким наиболее известным зависимостям, разработанным разными авторами. Показано, что наилучшие результаты дают расчеты по формулам Э. М. Ольдекопа и П. Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по предложенному уравнению связи, полученному Ю. А. Сало. Предложена схема расчета стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Ключевые слова: испаряемость; испарение; сток с водосбора.

Yu. A. Salo, L. E. Nazarova, A. F. Balagansky. **COMPUTATIONS OF
EVAPORATION FROM WATERSHEDS OF NORTH-WESTERN RUSSIA**

The paper presents a comparison between the results of calculations of the potential rate of evaporation and gross evaporation from watersheds of Northwest Russia with some best known dependencies developed by different authors. It is demonstrated that the best results are achieved using the formulae developed by Oldekop and Schreiber, where normal potential rates of evaporation are calculated with a regression obtained by Yu. A. Salo. A model for estimating runoff from hydrologically understudied watersheds based on observed data on air temperature and atmospheric precipitation is proposed.

Keywords: potential rate of evaporation; evaporation; runoff.

Введение

Одной из основных составляющих водного баланса водосборов является испарение с поверхности суши. Через величину испарения связаны уравнения водного и теплового

баланса водосбора. Особенность самого процесса испарения (включающего физическое испарение и транспирацию), разнообразие физико-географических характеристик водосборов, наличие или отсутствие исходных данных для расчета способствовали разработке

Таблица 1. Формулы для расчета годового суммарного испарения и испаряемости

Автор	Расчетная формула	
	в исходном виде	относительно E_o
П. Шрайбер	$E = P \left(1 - e^{-\frac{E_o}{P}} \right)$	$E_o = -P \ln \left(1 - \frac{E}{P} \right)$
В. С. Мезенцев и Л. Тюрк	$E = E_o \left[1 + \left(\frac{P}{E_o} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}$	$E_o = \frac{EP}{\sqrt{P^2 - E^2}}$ (при $n = 2$)
Э. М. Ольдекоп	$E = E_o th \left(\frac{P}{E_o} \right)$	в явном виде отсутствует
М. И. Будыко	$E = \sqrt{E_o th \left(\frac{P}{E_o} \right) P \left(1 - e^{-\frac{E_o}{P}} \right)}$	в явном виде отсутствует
Л. Тюрк		$E_o = 300 + 25T^2 + 0,05T^3$
А. Н. Постников		$E_o = (350 + 5,5T) e^{0,07T}$

большого количества методов расчета испарения. Среди них можно особо выделить методы, основанные на уравнении связи (в том или ином виде) испарения E и атмосферных осадков P с учетом испаряемости E_o . В качестве последней величины обычно рассматривается максимально возможное испарение при данных метеорологических условиях с достаточно увлажненной подстилающей поверхности. Наиболее известны расчетные зависимости, разработанные П. Шрайбером, Э. М. Ольдекопом, М. И. Будыко, В. С. Мезенцевым, Л. Тюрком и др. [Багров, 1954; Мезенцев, 1973; Методы изучения..., 1981; Братсерт, 1985]. Величина испаряемости непосредственно зависит от поступления тепла к испаряющей поверхности, т. е. от ее радиационного баланса. М. И. Будыко [1948] показал, что $E_o = R_o/L$, где R_o – радиационный баланс увлажненной территории, L – скрытая теплота испарения. Определение радиационного баланса водосборов затруднено, а иногда и невозможно из-за редкой сети специализированных метеорологических станций, поэтому разработаны эмпирические методы определения E_o на основе использования сетевой гидрометеорологической информации [Константинов, 1971; Методы изучения..., 1981; Братсерт, 1985]. Зависимости вида $E_o = E_o(T)$, где T – норма температуры воздуха, предложены, в частности, Л. Тюрком в 1955 году и А. Н. Постниковым [1999].

Поскольку на территории Республики Карелия отсутствуют массовые и продолжительные инструментальные наблюдения, необходимые для расчета элементов радиационного баланса, режима грунтовых вод, водно- и теплофизических свойств почвогрунтов и других характеристик, определяющих испарение с поверхности суши (к настоящему времени на сети станций и постов Карелии полностью

прекращены наблюдения по водным и почвенным испарителям), в работе была поставлена задача оценить применимость наиболее распространенных формул для расчета нормы испаряемости и суммарного испарения для исследуемой территории.

Материалы и методы

В данной работе были проанализированы наиболее известные формулы вида $E = E(P, E_o)$, приведенные в таблице 1 (в исходном виде и преобразованные нами относительно E_o).

Для сравнительного анализа искомым результатам были использованы опубликованные данные по многолетнему водному балансу (осадки, средний годовой речной сток и испарение) за период 1891–1960 гг. для речных водосборов Северо-Запада России [Водные ресурсы..., 1967]. Схема расположения 46 водосборов, сведения об элементах водного баланса которых были использованы при расчетах (далее – расчетных водосборах), и 15 контрольных водосборов показана на рисунке 1. Норма годовой температуры воздуха T для каждого из них определена по картам [Климатический атлас..., 1960].

Для каждого расчетного водосбора по известным значениям нормы осадков и суммарного испарения по формулам Шрайбера, Мезенцева – Тюрка, Тюрка и Постникова были рассчитаны значения средней многолетней величины испаряемости E_o . Формулы Ольдекопа и Будыко нельзя преобразовать к простому относительно E_o виду из-за использования гиперболического тангенса, поэтому расчет по ним выполнялся подбором по известным значениям P и E для каждого расчетного водосбора. Затем для каждой формулы исследовалась зависимость испаряемости от температуры



Рис. 1. Схема расположения центров расчетных (1) и контрольных (2) водосборов

воздуха. В качестве основного для исследования связей климатических характеристик и элементов водного баланса территории выбран метод статистического анализа.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного исследования установлено, что зависимость испаряемости от температуры воздуха может быть выражена полиномом степени $n = 2$

$$E_o = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2. \quad (1)$$

Численные значения параметров уравнения (1) (табл. 2), вычисленные с использованием

программы Statistica, заметно различаются в зависимости от того, какая формула используется для расчета E_o .

Как показал А. П. Вершинин [1999], «несмотря на имеющуюся в литературе взаимную критику методов, принципиальных различий между ними нет», однако при практическом применении уравнений связи можно получить существенно разные результаты.

Проверка полученных зависимостей была выполнена как по исходной (46 водосборов), так и по независимой выборке (15 водосборов). Для каждого из них были рассчитаны значения нормы испаряемости $E_o(T)$ по уравнению (1) с коэффициентами из таблицы 2 и формулам

Таблица 2. Значения параметров уравнения (1) для различных расчетных формул

Автор	Значения параметров		
	a_0	a_1	a_2
П. Шрайбер	433	95	3,41
М. И. Будыко	377	77	2,69
В. С. Мезенцев – Л. Тюрк	362	75	2,86
Э. М. Ольдекоп	329	62	2,14

Тюрка и Постникова и суммарного испарения $E(P, E_0)$ для всех рассматриваемых зависимостей, а также оценена их абсолютная и относительная погрешность.

Сопоставление показало, что наилучшие результаты дают формулы Ольдекопа и Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по полученному уравнению связи (1) с соответствующими коэффициентами из таблицы 2 (рис. 2). При этом рассчитанные по указанным формулам величины испарения практически совпадают для всех контрольных водосборов (графики 2 и 4 на рис. 2). Использование для расчетов испаряемости остальных формул, представленных в таблице 1, дает менее точные результаты.

Расчеты испаряемости и испарения по формуле Ольдекопа, в которой нормы испаряемости рассчитывались по предложенному уравнению связи, были использованы при изучении динамики элементов водного баланса водосбора Онежского озера в условиях нестационарности климата [Назарова, 2010].

Поскольку Онежское озеро фактически является водохранилищем, в качестве климато-зависимого элемента был исследован приток воды в озеро. Для оценки влияния изменения

климата на речной сток с водосбора была установлена связь между речным стоком и климатическими характеристиками. Для годовых интервалов уравнение водного баланса было рассмотрено в виде:

$$P - R - E [P, E_0(T)] \pm W = 0, \quad (2)$$

где P – суммы атмосферных осадков, мм; R – общий речной сток, мм; E – суммарное испарение с водосбора; E_0 – испаряемость, мм; W – остаточный член уравнения, объединяющий аккумуляционные и неучтенные составляющие годового баланса, а также погрешности расчета всех характеристик.

При расчете суммарного испарения для речных водосборов была использована формула Э. М. Ольдекопа (см. табл. 1), в которой испаряемость рассчитывалась по формуле, полученной для территории Карелии [Сало, 2003]:

$$E_0 = 329 + 62T + 2,14T^2. \quad (3)$$

Далее была установлена зависимость W от средней по водосбору годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков, коэффициенты парной корреляции равны $-0,81$ и $+0,59$ соответственно:

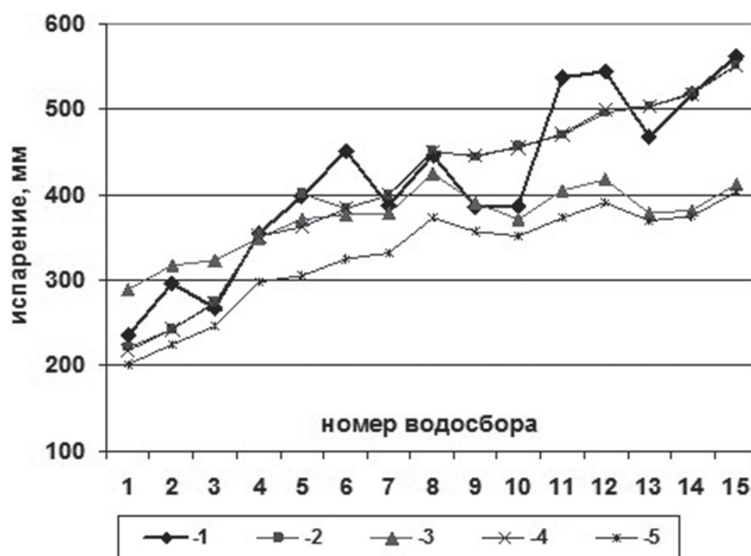


Рис. 2. Суммарное испарение с контрольных водосборов (1) [Водные ресурсы..., 1967] и рассчитанное по формулам Ольдекопа (2), Будыко (3), Шрайбера (4) и Мезенцева–Тюрка (5)

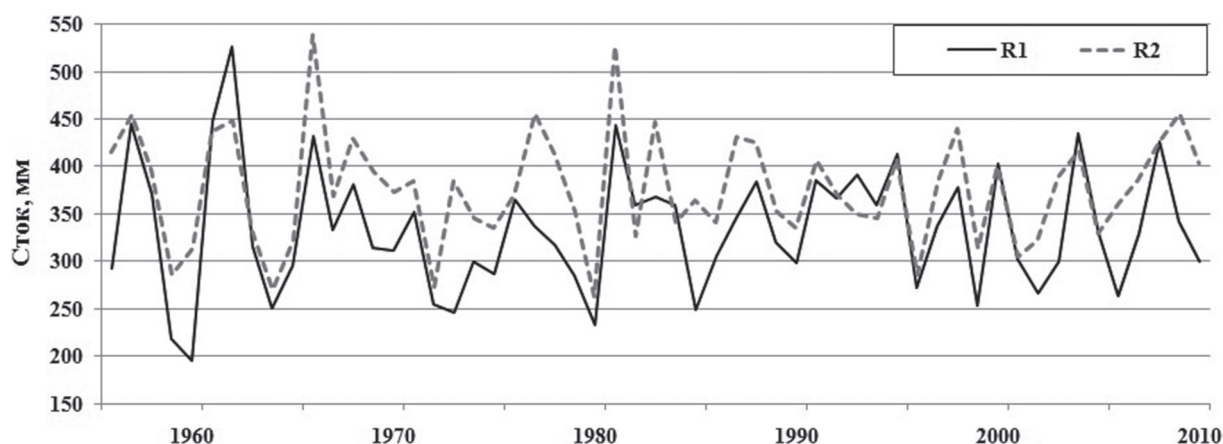


Рис. 3. Сток с водосбора Онежского озера, мм: R1 – по данным многолетних наблюдений; R2 – рассчитанный по формулам (2)–(4)

$$W = -211 + 0,38P - 46,04T. \quad (4)$$

Коэффициент множественной корреляции полученной зависимости равен 0,80, стандартная ошибка расчета по формуле составила 5,7 %. Полученная формула для водосбора Онежского озера может быть использована для расчета параметра W , используя ряды годовой температуры воздуха и годовых сумм осадков [Назарова, 2010].

В результате проведенных вычислений, выполненных по предложенным формулам (2)–(4), был получен многолетний ряд значений притока воды в Онежское озеро.

Для проверки достоверности полученного ряда был проведен расчет притока с привлечением данных по стоку изученных в гидрологическом отношении рек водосбора. В Онежское озеро впадают 52 реки длиной более 10 км [Гронская, 2008]. В гидрологическом отношении изучено 20 рек. Длина рядов наблюдений за стоком различна. В процессе работы временные ряды значений среднегодового стока рек – притоков Онежского озера удлинялись, пропуски наблюдений были восстановлены, для чего применялись общепринятые методы, изложенные в работах [Ресурсы..., 1972; Многолетние данные..., 1986]. Полученные восстановленные ряды оценивались на однородность по критериям Стьюдента и Фишера.

Для оценки притока в Онежское озеро по периметру с учетом асимметричности водосбора были уточнены и оцифрованы площади водосборов как самого озера, так и его притоков. Сток с неизученной территории принимался как среднее арифметическое между значениями модуля стока со смежных водосборов. В случае, когда смежный водосбор с малой величиной площади граничит с большим по площади водосбором и малым (изученная территория),

величина его модуля стока принималась по водосбору с наименьшей величиной. В результате проделанной работы был получен ряд средних годовых значений стока в Онежское озеро за 1956–2010 гг. [Балаганский и др., 2015].

На рисунке 3 представлены значения стока с водосбора Онежского озера, полученные по данным многолетних наблюдений и уточненные с учетом стока с неизученных территорий, и результаты расчета притока воды в водоем, выполненные по предложенным формулам (2)–(4). Как следует из приведенных графиков, полученные расчетные результаты хорошо соответствуют измеренным величинам. Коэффициент корреляции составляет 0,73, средняя ошибка расчета 11 %. Предложенная нами схема расчета может быть использована для оценки стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов Северо-Запада России по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Выводы

Целью данного исследования было оценить применимость известных методов расчета испаряемости и испарения и уточнить их для водосборов Северо-Запада России. Показано, что наилучшие результаты дают расчеты по формулам Ольдекопа и Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по уравнению связи (1) с предложенными коэффициентами. Уравнения связи испаряемости и температуры воздуха могут быть использованы как региональные формулы для уточнения годовых и многолетних значений испаряемости и суммарного испарения, их расчета для неизученных водосборов, уточнения карт норм основных составляющих водного баланса региона. Предложенная нами схема расчета (зависимости

2–4) может быть использована для оценки стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов Северо-Запада России по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Литература

Багров Н. А. О расчете испарения с поверхности суши // Метеорология и гидрология. 1954. № 2. С. 12–18.

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 290–293.

Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 136 с.

Вершинин А. П. Анализ и оценка современных методов определения испарения с природных ландшафтов // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: РГГМУ, 1999. С. 121–141.

Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 200 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Москва, 2014. 60 с.

Гронская Т. П. Водные ресурсы озер // Водные ресурсы России и их использование / Ред. И. А. Шикломанов. СПб.: ГГИ, 2008. С. 166–175

Климатический атлас СССР / Ред. Ф. Ф. Давитая. М.: ГУГМС, 1960. Т. 1. С. 7–42.

Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 532 с.

Литвиненко А. В., Богданова М. С., Карпечко В. А., Литвинова И. А. Исследование водных ресурсов бассейна Онежского озера и их использования на основе ГИС-технологий // Известия РГО. 2012. Т. 144, вып. 2. С. 69–80.

Мезенцев В. С. Расчеты водного баланса. Омск: ОСХИ, 1973. 80 с.

Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Государственный гидрологический институт. СПб., 2010. 162 с.

Методы изучения и расчета водного баланса / Ред. В. С. Вуглинский, Г. С. Клейн и др. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 201–233.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1, вып. 5. 687 с.

Назарова Л. Е. Влияние колебания климата на сток с водосбора Онежского озера // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 171–174.

Постников А. Н. К оценке среднемноголетнего суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: РГГМУ, 1999. С. 141–152.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 2. 957 с.

Сало Ю. А. Закономерности многолетних колебаний элементов водного баланса территории Карелии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003. 24 с.

Швец П. Д. Водный баланс Онежского озера // Сб. работ Ленинградской гидрометеорологической обсерватории. Л., 1977а. Вып. 2. С. 25–53.

Швец П. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследование режима и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии. Л., 1977б. Вып. 2. С. 3–24.

Поступила в редакцию 19.05.2016

References

Bagrov N. A. O raschete ispareniya s poverkhnosti sushi [On the calculation of land surface evaporation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 1954. No. 2. P. 12–18.

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Resursy rechnogo stoka i vodnyi balans [River runoff resources and water balance]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest impounded lakes of the North-western part of European Russia: current state and ecosystem changes under climatic and human impacts]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 31–38.

Bratsert U. Kh. Isparenie v atmosferu. Teoriya, istoriya, prilozheniya [Evaporation into the atmosphere. Theory, history, applications]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. P. 290–293.

Budyko M. I. Isparenie v estestvennykh usloviyakh [Evaporation under natural conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1948. 136 p.

Gronskaya T. P. Vodnye resursy ozer [Water Resources of Lakes]. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water resources of Russia and their uses]. Ed. I. A. Shiklomanov. St. Petersburg, 2008. P. 166–175.

Klimaticheskii atlas SSSR [Climate Atlas of the USSR]. Ed. F. F. Davitaya. Moscow, 1960. Vol. 1. P. 7–42.

Konstantinov A. R. Isparenie v prirode [Evaporation in nature]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 532 p.

Litvinenko A. V., Bogdanova M. S., Karpechko V. A., Litvinova I. A. Issledovanie vodnykh resursov basseina Oнежского озера i ikh ispol'zovaniya na osnove GIS-tehnologii [Study of the water resources of the Lake Onego catchment and their exploitation on the basis of GIS technology]. *Izvestiya RGO* [The RGS Herald]. 2012. Vol. 144, iss. 2. P. 69–80.

Mezentsev V. S. Raschety vodnogo balansa [Water balance calculations]. Omsk: OSKhl, 1973. 80 p.

Metodicheskie rekomendatsii po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredeleniyu ikh raschetnykh znachenii po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations on the assessment of the hydrological characteristics homogeneity and determination of their calculated value based on heterogeneous data]. Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut [State Hydrological Institute]. St. Petersburg, 2010. 162 p.

Metody izucheniya i rascheta vodnogo balansa [Methods of water balance study and calculation]. Eds. V. S. Vuglinskii, G. S. Klein et al. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. P. 201–233.

Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. Basseiny rek Baltiiskogo morya, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer [Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Drainage basins of the Baltic Sea rivers, lakes Onego and Lado-ga]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. Vol. 1, iss. 5. 687 p.

Nazarova L. E. Vliyanie kolebaniya klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Climate fluctuations influence on the runoff from the Lake Onego catchment]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. 2010. No. 1. P. 171–174.

Postnikov A. N. K otsenke srednemnogoletnego summarnogo ispareniya s poverkhnosti sushi na osnove uravnenii svyazi [On estimating the long-term annual average of the land surface evaporation based on the constraint equation]. Sovremennye problemy gidrometeorologii [Journal of Hydrometeorology]. St. Petersburg: RGGMU, 1999. P. 141–152.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. Kareliya i Severo-Zapad [Main hydrological

characteristics. Karelia and the North-West Russia]. Leningrad, 1972. Vol. 2. 957 p.

Salo Yu. A. Zakonomernosti mnogoletnikh kolebaniy elementov vodnogo balansa territorii Karelii [Some patterns of long-term fluctuations of water balance elements in Karelia]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2003. 24 p.

Shvets P. D. Vodnyi balans Onezhskogo ozera [Lake Onego water balance]. Sb. rabot Leningradskoi gidrometeoobservatorii [Proceedings of the Leningrad Hydrometeorological Observatory]. Leningrad, 1977a. Iss. 2. P. 25–53.

Shvets P. D. Gidrologicheskaya izuchennost' Onezhskogo ozera i ego basseina [State of hydrological knowledge of Lake Onego and its catchment]. Issledovanie rezhima i raschety vodnogo balansa ozer-vodokhranilishch Karelii [Regime studies and water balance calculations of impounded lakes in Karelia]. Leningrad, 1977b. Iss. 2. P. 3–24.

Vershinin A. P. Analiz i otsenka sovremennykh metodov opredeleniya ispareniya s prirodnykh landshaftov [Analysis and assessment of the current methods for determination of evaporation from natural landscapes]. Sovremennye problemy gidrometeorologii [Journal of Hydrometeorology]. St. Petersburg: RGGMU, 1999. P. 121–141.

Vodnye resursy i vodnyi balans territorii Sovetskogo Soyuz [Water resources and water balance of the Soviet Union]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 200 p.

Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezюме [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Impact on the Territory of the Russian Federation. General Summary]. Moscow, 2014. 60 p.

Received May 19, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сало Юрий Андреевич

старший научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

Назарова Лариса Евгеньевна

заместитель директора по НИР, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

Балаганский Андрей Федорович

главный гидролог лаборатории географии и гидрологии
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTORS:

Salo, Yuri

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Nazarova, Larisa

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

Balagansky, Andrey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576381