

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.512

Ю. В. КАРПЕЧКО, Н. А. МЯСНИКОВА

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск

ВОДНО-БАЛАНСОВЫЕ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Хозяйственная деятельность оказывает заметное влияние на формирование водных ресурсов. Степень этого влияния во многом зависит от климатических условий. Основную роль в изменении испарения и стока под влиянием антропогенных факторов играют радиационный баланс, осадки и соотношение между ними (радиационный индекс сухости). Наибольшую долю потерь воды с водосбора в период эксплуатации водохранилища составляет разница между испарением с водной поверхности и участка суши до его затопления. Величина отношения изменения испарения после сооружения водохранилища к осадкам на равнинной местности увеличивается по экспоненциальному закону с ростом радиационного индекса сухости. При его значениях меньше 0,6–0,7 увеличение водной поверхности на водосборе может приводить к снижению испарения. В регионах, где значения радиационного индекса сухости превышают 1, сооружение водохранилищ ведет к увеличению испарения и снижению водных ресурсов. При наличии практически водонепроницаемых поверхностей наблюдается уменьшение испарения с участков суши. Наибольшее его снижение происходит в регионах с радиационным индексом сухости от 1 до 1,5. При значениях <1 и >1,5 абсолютные величины разницы испарения уменьшаются. Получена связь между относительной величиной изменения испарения и радиационным индексом сухости. Интенсивность снижения испарения с территорией населенных пунктов по мере уплотнения застроек возрастает с увеличением радиационного индекса сухости. Увеличение осадков и радиационного баланса сопровождается возрастанием стока (снижением испарения) после рубок. Существенное влияние на изменение элементов водного баланса лесных участков после рубок в одинаковых климатических условиях оказывает продуктивность удаляемого древостоя.

Ключевые слова: климат, испарение, сток, водохранилища, дороги, рубки.

Economic activities have a tangible effect on the formation of water resources. The degree of this influence largely depends on climatic conditions. A dominant role in changes in evaporation and runoff under the influence of anthropogenic factors is played by the radiation balance, atmospheric precipitation and the relationship between them (radiation index of dryness). The largest proportion of water losses from the drainage area during the reservoir operation corresponds to the difference between evaporation from the water surface and from the tract of land surface prior to its impounding. The value of the ration of changes in evaporation after the construction of the reservoirs to precipitation amounts on the flat terrain increases exponentially with an increase in the radiation index of dryness. When its values are less than 0,6–0,7, an increase in water surface across the drainage area can involve a decrease in evaporation. In regions where the values of the radiation index of dryness exceed 1, the construction of the reservoirs leads to an increase in evaporation and a decrease in water resources. The existence of almost impermeable surfaces causes a decrease in evaporation from tracts of land surface. Its largest decrease occurs in regions with the radiation index of dryness varying from 1 to 1,5. At <1 and >1,5, the absolute values of the difference of evaporation decrease. We obtained a correlation between the relative value of variation in evaporation and the radiation index of dryness. The rate of decrease in evaporation from territories of human settlements with a densification of buildings increases with an increase in the radiation index of dryness. An increase in precipitation amounts and radiation balance is accompanied by an increase in runoff (a decrease in evaporation) after felling operations. Productivity of the forest stand in the felling sites has a substantial influence on changes in water balance elements of forest stands after felling operations under identical climatic conditions.

Keywords: climate, evaporation, runoff, reservoir, roads, felling operations.

Водные ресурсы — важный фактор развития экономики и обеспечения комфортности жизни человека, поэтому изучению проблем их формирования и использования в различных природных условиях уделяется большое внимание [1–3]. Возникающие при этом трудности в создании методов расчета и прогноза речного стока, усредненные по территории значения которого являются показателем со-

стояния водных ресурсов региона, обусловлены сложной взаимосвязью всех компонентов природной среды (климата, растительного покрова, почвогрунтов, поверхностных и подземных вод и пр.), подверженных влиянию антропогенных факторов, усиливающихся по мере развития цивилизации.

Изучению влияния хозяйственной деятельности на формирование водных ресурсов и разработке методов оценки их преобразований посвящены работы [4–7]. Степень изменения испарения и стока после конкретного воздействия зависит от ряда факторов, среди которых значительную роль играет климат. Исследование влияния климатических характеристик на величины преобразования элементов водного баланса позволит распространять полученные оценки на другие природные условия.

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИСПАРЕНИЯ ПОСЛЕ СООРУЖЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

Влияние водохранилищ в период их эксплуатации на водные ресурсы региона зависит прежде всего от размеров водоемов и климатических факторов. Основное воздействие водохранилищ связано с изменением испарения с затопленных и подтопленных участков суши [2, 6, 8]. Большая доля потерь воды с водосбора обусловлена разницей между испарениями с созданной человеком водной поверхности и с затопленного участка суши до сооружения водохранилища. Поэтому для оценки изменения испарения dE_W можно использовать следующее равенство:

$$dE_W = E_W - E_l, \quad (1)$$

где E_W — испарение с водной поверхности, мм; E_l — испарение с затопленного участка суши до сооружения водохранилища, мм.

Уравнение (1) позволяет оценивать ту часть изменения водных ресурсов, которая подвержена влиянию преимущественно климатических факторов. Однако изменение испарения с подтопленной территории зависит еще и от рельефа, гидрогеологических условий, характера подстилающей поверхности и ее преобразования после сооружения водохранилища. Оценка этой части изменения испарения представляет собой сложную задачу. По данным, приведенным в [8], величина изменения испарения с подтопленной части составляет в среднем 0,77 от величины изменения испарения с затопленной части водохранилища. Из тех же данных следует, что площадь подтопленной территории в среднем в два раза меньше затопленной. Все это позволяет прийти к заключению, что полученное по уравнению (1) значение оценки изменения испарения в большинстве своем всего лишь на 8 % выше величины суммарной оценки, учитывающей и роль подтопленной части территории. Такое отклонение не превышает возможных ошибок в расчетах испарения по существующим методам.

В настоящей работе использованы опубликованные в [2, 8] оценки изменения испарения после сооружения водохранилищ на территории бывшего СССР, дополненные рассчитанными нами для сравнительно небольших водохранилищ, расположенных в Карелии и на Кольском полуострове. При расчете испарения с водной поверхности использовался подход, основанный на показаниях наземных водных испарителей ГГИ-3000, а в качестве величины испарения с суши принималось среднее из полученных по методам М. И. Будыко и А. Р. Константинова значений [9]. Методы расчета испарения с водной поверхности и с суши и обоснование возможности их применения представлены в работе [10].

Испарение с участков суши определяется радиационным балансом и степенью увлажнения поверхностного слоя почвогрунтов, которая зависит от величины осадков. При достаточно высоком увлажнении почвогрунтов, покрывающем затраты влаги на испарение, повышение радиационного баланса сопровождается возрастанием испарения как с суши, так и с водной поверхности. В этих условиях при увеличении площади водной поверхности изменения испарения будут невелики. Рост радиационного баланса и соответствующее превышение его над количеством энергии, затрачиваемым на испарение влаги из почвы, приводят в конечном счете, из-за возникновения дефицита влаги в почве, к снижению испарения с суши. При этом испарение с водной поверхности увеличивается, и значение оценки, полученной по уравнению (1), будет возрастать. Следовательно, увеличение dE_W обусловлено отношением радиационного баланса к затратам энергии, необходимой для испарения осадков (B/PL), названным М. И. Будыко [11] радиационным индексом сухости. Этот вывод подтверждается рис. 1, и зависимость между изменением испарения и радиационным индексом сухости можно представить в следующем виде:

$$dE_W = P \exp(0,68B/PL - 0,50) - 1, \quad (2)$$

где B — радиационный баланс, мДж/(м²·год); P — годовая сумма осадков, мм; L — удельная теплота испарения, МДж/кг.

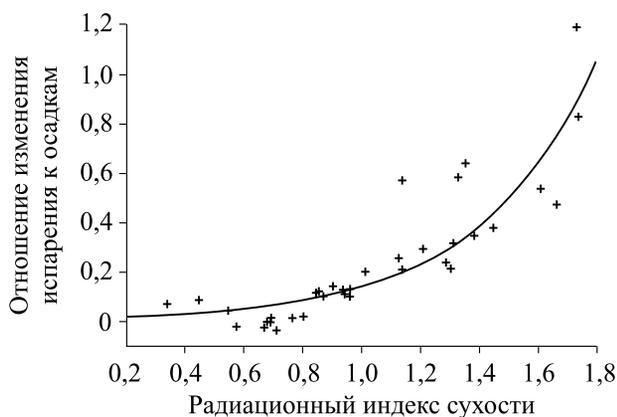


Рис. 1. Зависимость относительной величины изменения испарения от радиационного индекса сухости после сооружения водохранилища.

Надежность полученной связи (дисперсия уравнения (2) на 82 % определяется изменчивостью радиационного индекса сухости) позволяет использовать ее для расчетов и прогнозов изменения слоя испарения при увеличении площади водной поверхности на водосборе в конкретных климатических условиях.

Наименьшее влияние на водные ресурсы сооружение водохранилищ оказывает в тех зонах,

где радиационный индекс сухости меньше 1. С использованием регрессионного анализа было установлено, что при значениях радиационного индекса сухости, не превышающих 0,6–0,7, увеличение водной поверхности в регионе может играть положительную роль [10]. В природных зонах, где значения радиационного индекса сухости превышают 1, сооружение водохранилищ ведет к снижению водных ресурсов региона, оценку которого можно установить по уравнению (2).

Изменение испарения, по данным публикаций [2, 8] и наших расчетов в различных географических зонах (здесь и далее использована классификация М. И. Будыко [11]), соответствует следующим значениям: в тайге от –20 до 90 мм, в степи от 100 до 700 мм, в полупустынях и пустынях более 700 мм.

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ УЧАСТКОВ СУШИ С ПРАКТИЧЕСКИ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Участки суши с практически водонепроницаемой поверхностью (ПВП), к которым относятся дороги, проезды и т. д., представляют собой техногенный ландшафт, в пределах которого условия формирования элементов водного баланса в наибольшей степени отличаются от естественных. Такие участки ограничены по площади, однако играют заметную роль в преобразовании водного баланса населенных пунктов [12, 13].

Изменение испарения с участков суши после сооружения ПВП оценивается по равенству

$$dE_r = E_r - E_l, \quad (3)$$

где E_r — испарение с практически водонепроницаемого покрытия, мм; E_l — испарение с участка суши до воздействия, мм.

Испарение с суши до воздействия принималось как средняя величина из полученных по методам М. И. Будыко и А. Р. Константинова значений [9]. Наибольшую сложность при решении уравнения (3) представляет определение испарения с ПВП. С таких участков суши значительная часть воды, поступившей при выпадении жидких осадков, стекает, и на испарение в основном расходуется влага, которая смачивает поверхность дорог и заполняет микропонижения и трещины. Эта влага испаряется в течение короткого периода после выпадения дождя.

Для расчета среднееголетней величины испарения с ПВП для летнего периода, основываясь на вышеизложенном и исходя из уравнения водного баланса, можно использовать, как это сделано в работе [14], формулу

$$E_{rl} = P_l(1 - \alpha), \quad (4)$$

где P_l — жидкие атмосферные осадки, мм; α — коэффициент стока.

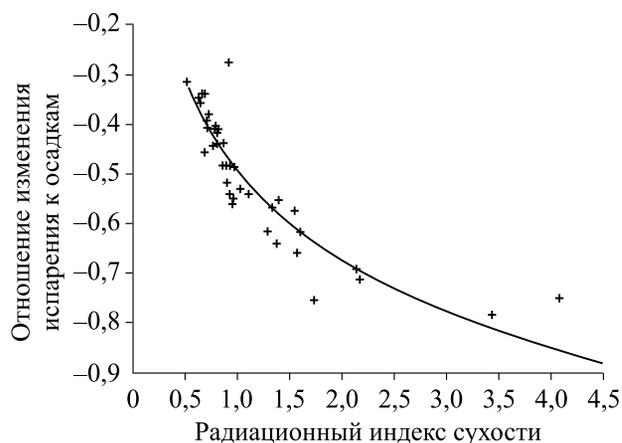
На основании выполненного анализа в расчетах принимался коэффициент стока, равный 0,78, — среднее значение, рекомендуемое для асфальтобетонных покрытий и для брусчатых мостовых [15].

В период со снежным покровом количество влаги на поверхности с асфальтобетонным покрытием превышает максимальную величину ее суточного испарения, поэтому расчет выполняется по формуле [9]

$$E_{rs} = 0,37dn, \quad (5)$$

где d — средняя величина дефицита упругости водяного пара за расчетный период, гПа; n — продолжительность расчетного периода, сут.

Рис. 2. Зависимость отношения изменения испарения к осадкам от радиационного индекса сухости для территорий с ПВП.



Для 45 пунктов наблюдений, расположенных в различных географических зонах, были рассчитаны значения испарения с естественных поверхностей и с ПВП по уравнениям (4) и (5). По (3) получены оценки изменения испарения, величины которых колеблются от -140 до -360 мм. Анализ пространственного распределения этих оценок выполнялся с использованием радиационного индекса сухости.

Испарение с ПВП и с участков суши до их преобразования определяется в основном климатическими факторами. С увеличением солнечной радиации при достаточно высоком увлажнении испарение с суши возрастает. Эта тенденция сохраняется до установления значений радиационного индекса сухости $1,0-1,5$. Дальнейшее его повышение, обусловленное как ростом радиационного баланса, так и уменьшением осадков, сопровождается, вследствие проявления дефицита влаги в почвогрунтах, снижением испарения. В рассматриваемых условиях величина испарения с суши изменяется в пределах от 200 до 530 мм.

Из-за сравнительно низкого испарения с ПВП и меньшей пространственной его изменчивости (расчетные величины испарения с ПВП колеблются от 50 до 200 мм) основное влияние на распределение dE_r оказывает испарение с естественной поверхности. Это определяет интенсивный рост dE_r с увеличением радиационного индекса сухости после сооружения ПВП в пределах территории с высоким увлажнением. Такая тенденция отмечается до зоны, где B/PL составляет $1-1,5$, а абсолютная величина антропогенной составляющей испарения достигает максимального значения. При продвижении в более засушливые регионы величина изменения испарения будет уменьшаться из-за последовательного снижения испарения с естественных поверхностей.

Влияние поверхности с низкими водопрпускными свойствами на испарение в различных климатических условиях выражается следующим логарифмическим уравнением (рис. 2):

$$dE_r/P = -0,49 - 0,18 \ln(B/PL). \quad (6)$$

Эта связь достаточно надежна, дисперсия относительной величины изменения испарения (относительно осадков) на 68% определяется радиационным индексом сухости.

Показанная на рис. 2 зависимость позволяет сделать вывод о том, что с увеличением радиационного индекса сухости отмечается возрастание доли осадков, составляющих изменение испарения. Такая тенденция наиболее выражена в зоне высокого увлажнения.

Снижение абсолютных величин испарения после сооружения ПВП в соответствии с расчетами составляет: для тайги — $150-350$ мм, для степи — $240-360$ мм, для полупустынь и пустынь — $140-290$ мм.

Практически водонепроницаемая поверхность занимает часть общей площади населенного пункта, и от доли такой поверхности во многом зависит водный баланс всего поселения. Для выяснения влияния плотности застройки на испарение в различных климатических условиях учитывалась роль только тех поверхностей, которые характеризуют крайние условия. Вся территория условного населенного пункта была разделена на две части. К одной отнесены участки с ПВП, а к другой — все остальные участки, испарение с которых принималось равным испарению, характерному для данных климатических условий.

Исследование влияния плотности застройки на изменение испарения удобнее выполнять с использованием линейной зависимости

$$dE_{r\Sigma}/E_m = k_a f_a/F, \quad (7)$$

где $dE_{r\Sigma}$ — изменение испарения со всей территории, мм; F — общая площадь условного населенного пункта, га; f_a — площадь территории, представленной ПВП, га; E_m — испарение с естественной поверхности, мм; k_a — коэффициент регрессии, показывающий интенсивность снижения испарения при увеличении доли площади, занятой ПВП.

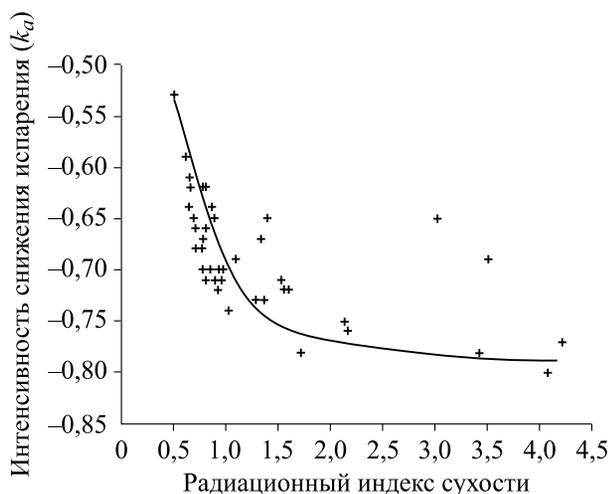


Рис. 3. Зависимость интенсивности снижения испарения с увеличением плотности застройки от радиационного индекса сухости.

Анализ величины коэффициента k_a , полученного для различных климатических условий, свидетельствует о зависимости его значения от радиационного индекса сухости. С его ростом интенсивность снижения испарения при повышении плотности застройки увеличивается от 0,5–0,6 в увлажненных районах до 0,75–0,8 в засушливых. В степных, полупустынных и пустынных регионах степень уплотнения играет наибольшую роль в изменении испарения, и величина k_a в этих зонах с изменением радиационного индекса сухости меняется мало (рис. 3).

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ И СТОКА С ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ПОСЛЕ РУБОК

Проблема влияния рубок древостоя на испарение и сток вследствие практической значимости интересует многих исследователей в различных регионах [16–18]. На основании большого числа экспериментальных исследований, охватывающих территорию от тайги до тропических лесов, авторами представлена зависимость изменения годового стока от среднегодовой величины осадков ($dY = f(P)$). Анализ этой линейной зависимости для хвойных лесов (с учетом результатов исследований в лесах России), рассматриваемой в пределах колебаний осадков от 450 до 2600 мм и изменений стока от 30 до 700 мм, показывает, что роль осадков в увеличении стока ограничивается 36 %. Следует отметить, что поиск других климатических характеристик для оценки изменения стока не увенчался успехом, что можно объяснить низкой точностью экспериментальных данных и слабой обусловленностью значений dY климатическими факторами. В связи с этим выявление и оценка роли факторов, определяющих изменения элементов водного баланса после удаления древостоя, могут представлять определенный интерес.

Древесная растительность произрастает при широком диапазоне изменений радиационного баланса и осадков. Радиационный индекс сухости на территории, занятой преимущественно лесами, изменяется от 0,3 до 1 [11]. Значительные колебания энергетических величин и достаточное увлажнение создают предпосылки для существенных изменений в пределах этой территории интенсивности продукционных процессов, что подтверждается информацией о продуктивности фитомассы. Ее значения, по данным, приведенным в работе [19], варьируют от 3–4 до 20–30 т/га в год. Эти изменения согласуются с распределением осадков и радиационного баланса, рост значений которых определяет повышение интенсивности физических и биохимических процессов, в том числе транспирации. Суммарное испарение с леса, большую часть которого составляет транспирация, также возрастает с увеличением радиационного баланса и осадков.

Основным фактором, определяющим изменение стока с лесного участка после удаления древостоя, является снижение испарения. Для рассматриваемой территории суммарная величина испарения зависит от величины радиационного баланса, состава древесной растительности и ее архитектуры, определяющей распределение осадков и солнечной энергии по высоте внутри растительного покрова. Для оценки изменения испарения нами предлагается уравнение, полученное как разница уравнений водного баланса, решаемых относительно испарения с участка леса после и до рубки [20]:

$$dE_f = E_{cl} - E_f = E_s (k_s - 1) - (E_t + E_i), \quad (8)$$

где E_{cl} , E_f — годовое испарение с вырубki (гари) и с леса до воздействия соответственно, мм; E_s — испарение с наземного покрова лесного участка до удаления древостоя, мм; k_s — переходный коэффициент, равный отношению испарения с вырубki (гари) к испарению под пологом леса; E_t — транспирация древостоя, произрастающего на лесном участке до воздействия, мм; E_i — испарение осадков с полога леса до удаления древостоя, мм.

При наличии необходимой информации уравнение (8) можно использовать для оценки влияния рубок и лесных пожаров в любых климатических условиях. В большинстве случаев применение этого уравнения ограничено отсутствием необходимых для расчета данных. Однако при теоретическом анализе уравнения можно сделать некоторые выводы о влиянии на величину dE_f ряда факторов.

Анализ показывает, что в среднем доля первого слагаемого правой части уравнения (8) не превысит 20–30 %, и для большей части лесной зоны основную роль в изменчивости dE_f играет второе слагаемое.

Увеличение солнечной радиации и осадков сопровождается ростом продуктивности растительного покрова и в целом фитомассы, что должно приводить к увеличению транспирации и испарения задержанных пологом леса осадков и, таким образом, к большему снижению испарения после удаления древостоя.

Однако изменение испарения после удаления древостоя определяется не только климатическими факторами. Эта величина во многом зависит от плодородия почв, влияющего на продуктивность древостоя и, следовательно, на транспирацию и испарение осадков с полога леса [21]. Связь плодородия почв с геологическими, геоморфологическими, гидрологическими условиями местности обуславливает его высокую пространственную вариацию даже в пределах небольшого региона.

Для таежной зоны расчеты по уравнению (8) показали наличие тенденции к увеличению dE_f с повышением продуктивности древостоя. При ее изменении в пределах от Va до I классов бонитета максимальное снижение испарения после удаления древостоя в таежной зоне может изменяться для сосняков от 150 до 315, для ельников от 230 до 295, для березняков от 190 до 260 мм. Показанная зависимость изменения испарения от продуктивности леса объясняет низкую точность связей изменений элементов водного баланса с климатическими факторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические факторы оказывают значительное влияние на степень изменения элементов водного баланса в результате хозяйственной деятельности. Относительная величина изменения испарения после сооружения водохранилищ увеличивается с ростом радиационного индекса сухости по экспоненциальному закону. Сооружение водохранилищ в зонах, где радиационный индекс сухости не превышает 1, не оказывает существенного влияния на водный баланс водосборов.

Отмечается связь между величинами снижения испарения с ПВП и радиационным индексом сухости. В избыточно увлажненных местностях с увеличением радиационного индекса сухости до 1–1,5 интенсивно возрастает антропогенная составляющая испарения и доля осадков в ней. При дальнейшем росте радиационного индекса сухости наблюдается уменьшение абсолютных величин снижения испарения.

Гидрологическая роль населенного пункта во многом зависит от площади, занимаемой ПВП. С увеличением доли такой поверхности в переувлажненных местностях снижение испарения происходит наименее интенсивно. С повышением индекса сухости интенсивность снижения испарения возрастает, достигая максимальных значений в зонах степей, полупустынь и пустынь.

Увеличение стока после рубок для всех участков суши от тайги до тропических лесов в большой степени зависит от климатических факторов и продуктивности удаляемого древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруков Л. А., Гагаринова О. В., Кичигина Н. В., Корытный Л. М., Фомина Р. А. Водные ресурсы Сибири: состояние, проблемы, возможности использования // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 4. — С. 30–41.
2. Водные ресурсы России и их использование / Ред. И. А. Шикломанов. — СПб.: Изд-во Гос. гидрол. ин-та, 2008. — 600 с.
3. Oki T., Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources // Science. — 2006. — Vol. 313. — P. 1068–1072.
4. Водогрещий В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 176 с.
5. Доброумов Б. М., Устюжанин Б. С. Преобразование водных ресурсов и режима рек и центра ЕТС. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 224 с.
6. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — 335 с.

7. **Millman J. D., Farnsworth K. L., Jones P. D., Xu K. H., Smith L. C.** Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000 // *Global Planet. Change.* — 2008. — Vol. 62. — P. 187–194.
8. **Вуглинский В. С.** Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 224 с.
9. **Рекомендации** по расчету испарения с поверхности суши. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 96 с.
10. **Карпечко Ю. В., Карпечко В. А.** Гидрологические преобразования отдельных водосборов Восточной Фенноскандии в результате сооружения водохранилищ // *Изв. РГО.* — 2003. — Т. 135, вып. 2. — С. 65–71.
11. **Будыко М. И.** Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 472 с.
12. **Куприянов В. В.** Гидрологические аспекты урбанизации. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 184 с.
13. **Taha H.** Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat // *Energy and Buildings.* — 1997. — Vol. 25. — P. 99–103.
14. **Львович М. И., Черногаева Г. М.** Преобразование водного баланса территории г. Москвы // *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* — 1976. — № 3. — С. 52–60.
15. **Дикарский В. С., Таубин А. П.** Расчет дождевых сетей канализации с помощью ЭВМ. — М.: Стройиздат, 1980. — 146 с.
16. **Крестовский О. И.** Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 118 с.
17. **Bosch J. M., Hewlett J. D.** A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration // *Journ. Hydrology.* — 1988. — Vol. 55. — P. 3–23.
18. **Sun G., Riekerk H., Comerford N. B.** Modeling the hydrologic impacts of forest harvesting on Florida Flatwoods // *Journ. Amer. Water Resources Association.* — 1998. — Vol. 34, N 4. — P. 843–854.
19. **Базилевич Н. И., Титлянова А. А.** Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 381 с.
20. **Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А.** Оценка изменения элементов водного баланса в первый год после рубок в таежной зоне Европейского Севера России // *Уч. зап. Рос. гидромет. ун-та.* — 2014. — № 33. — С. 31–44.
21. **Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л.** Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2010. — 225 с.

Поступила в редакцию 6 августа 2014 г.