

УДК 556.16 (556.51)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ РЕК ГУМИДНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Савичев О.Г., Паромов В.В.

Томский политехнический университет, Томск, e-mail: OSavichev@mail.ru;

Томский государственный университет, Томск, e-mail: pvv0266@mail.ru

Цель исследования – разработка и апробация способа оценки водного стока, пригодного для моделирования условий формирования гидрогенных месторождений полезных ископаемых, долгосрочного прогноза их изменения на фоне крупномасштабных изменений климата и окружающей среды, восстановления и моделирования гидрологических рядов с использованием данных дистанционного зондирования Земли, а также инженерных изысканий для строительства на слабо изученных территориях. В результате проведенного исследования предложен метод определения характерных расходов воды (среднемесячных, максимальных, минимальных) средних рек Западной Сибири, а также подземной составляющей речного стока. Метод основан на использовании уравнения равномерного установившегося движения потока и предполагает применение как стандартных данных, полученных на государственной режимной сети Росгидромета, так и материалов дистанционного зондирования Земли. Выполнена апробация метода по данным о среднемесячном годовом и подземном стоке, максимальном расходе весеннего половодья обеспеченностью 1% и минимальном месячном расходе воды зимней межени обеспеченностью 80% для рек бассейна Средней Оби. Показано, что метод эффективен при исследовании гидрологически неизученных или слабо изученных территорий. Рассмотрены направления его использования для решения фундаментальных и прикладных задач гидрологии, геоэкологии и водного хозяйства.

Ключевые слова: оценка водного стока, отсутствие данных наблюдений, средние, максимальные, минимальные расходы воды, подземный сток, Западная Сибирь

METHOD OF THE ESTIMATION OF CHARACTERISTICS OF THE RUNOFF FLOW AT ABSENCE OF SUPERVISION

Savichev O.G., Paromov V.V.

Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: OSavichev@mail.ru;

Tomsk state university, Tomsk, e-mail: pvv0266@mail.ru

The purpose of research – development and approbation of a way of an estimation of a water flow, suitable for modelling conditions of formation of hydrogenic mineral deposits, the long-term forecast of their change on a background of large-scale changes of a climate and an environment, restoration and modelling of hydrological lines with use of the remote sensing data, and also engineering researches in poorly investigated territories. The method of definition of a total (mean, maximal, minimal) runoff flow of the average rivers of Western Siberia and its ground component is offered. The method is based on use of the equation of the uniform stationery movement of a conditional stream and assumes application of the standard data which are received on the state regime network of the Roshydromet and materials of remote sensing. Approbation of this method on the data about annual total and ground flow, the maximal water discharge of a spring flood by probability 1% and the minimal monthly discharge of winter low water by probability 80% for the rivers in the Middle Ob river basin is executed. The method is effective at research hydrology unexplored or poorly investigated territories with a view of engineering researches, an estimation of resources of ground waters, planning of actions on protection of water resources and prevention of negative influence of waters. Directions of its use for the decision of fundamental and applied problems of a hydrology, geocology and water management are offered.

Keywords: an estimation of a runoff flow, absence of supervision, mean, maximal and minimal water discharges, ground flow, Western Siberia

Оценка среднего, максимального и минимального речного стока является одной из важнейших задач в вопросе исследования взаимодействия природы и человека и входит в базовый набор работ инженерных гидрометеорологических и экологических изысканий при проектировании и строительстве всех видов водохозяйственных систем и сооружений. Кроме того, определение параметров речного стока является ключевым аспектом решения таких проблем, как моделирование условий формирования гидрогенных месторождений полезных ископаемых и прогноз изменения состояния окружающей среды.

Традиционно, вопрос расчёта основных характеристик стока решается в рамках современных представлений о гидрологических процессах на основе трёх подходов – при наличии данных наблюдений, их недостаточности и отсутствии. Последний подход, фактически, базируются на определении отношения объёма доступных водных ресурсов к времени их добегаания от истоков водотока до контрольного створа:

$$Q_p = \frac{V_{T,p}}{\tau_{T,p}}, \quad (1)$$

где Q_p – характерный расход воды, рассчитанный за период времени T ; $V_{T,p}$ и $\tau_{T,p}$ –

соответствующие ему объём доступных водных ресурсов и время добегания водных масс.

В рамках данного подхода разработаны методы расчёта средних, максимальных и минимальных расходов [9, 12, 13], различия между которыми заключаются в интерпретации времени добегания, как:

1) функции от площади или высоты водосбора (методы расчёта среднегогодовых расходов, максимальных расходов весеннего половодья, минимального стока межлетнего периода);

2) времени стекания дождевых вод, превышающего время испарения воды (метод расчёта максимальных расходов дождевых паводков).

Соответственно, используются различные подходы к определению значений $V_{T,p}$ и $\tau_{T,p}$. В ряде случаев предлагаемые методы являются неоправданно (с точки зрения точности расчёта) усложнёнными за счёт ввода в расчет большого количества эмпирических коэффициентов и не всегда позволяют получить сопоставимые результаты, особенно при оценке последствий планируемой хозяйственной деятельности. Это и определило цель рассматриваемой работы – разработку метода определения характерных расходов воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, пригодного для оценки антропогенного влияния на окружающую среду, проектирования инженерных систем и палеогеографических реконструкций.

Обоснование способа

Физическое основание предлагаемого способа – основное уравнение равномерного установившегося движения открытого речного потока в виде:

$$Q_p = B_c \cdot h_c^{\frac{5}{3}} \cdot J_c^{\frac{1}{2}} \cdot n_c^{-1}, \quad (2)$$

где Q_p – расчётный расход воды; B_c и h_c – ширина и глубина речного потока; J_c – уклон водной поверхности; n_c – коэффициент шероховатости [9, 11]. Представим, что по всему водосбору, имеющему среднюю ширину B_b ($B_b \approx F_b/L_c$, где F_b – площадь водосбора; L_c – длина водотока), движется водный поток с расходом, равным Q_p , и соответствующими ему средней глубиной ξ и уклоном водной поверхности $J_{b,\xi}$.

Тогда уравнение (2) можно переписать в виде:

$$Q_p \approx B_b \cdot \xi^{\frac{5}{3}} \cdot J_{b,\xi}^{\frac{1}{2}} \cdot n_b^{-1}, \quad (3)$$

где n_b – коэффициент шероховатости поверхности водосбора [8].

Использование уравнения (3) предполагает обоснование физического смысла

параметров ξ , $J_{b,\xi}$, n_b и разработку методик их определения.

Во-первых, предположим, что коэффициент шероховатости поверхности водосбора можно оценить как значение, средневзвешенное по площадям открытых пространств и территорий, занятых болотами, озёрами, лесами:

$$n_b = \frac{\sum n_i \cdot f_i}{100}, \quad (4)$$

где n_i – шероховатость условно однородного участка поверхности водосбора с относительной площадью f_i .

Для условий Западной Сибири коэффициенты шероховатости могут быть ориентировочно приняты, согласно [9]: для леса – 0,2; болот и тундры – 0,14; пойменных и внутриводоточных озёр – 0,05; открытых суходольных участков – 0,03.

Во-вторых, допустим, что между глубиной условного потока ξ и атмосферным увлажнением за предшествующий период времени T существует связь. Вид такой зависимости можно определить исходя из условия – один и тот же расход воды водотока шириной B_b и с коэффициентом шероховатости n_b может наблюдаться при различных соотношениях уклона водной поверхности и глубины:

$$\left(\frac{Q_p \cdot n_b}{B_b} \right)^2 = J_{b,X} \cdot X_{T,p}^3 = J_{b,\xi} \cdot \xi^3, \quad (5)$$

где $J_{b,X}$ – уклон поверхности условного потока глубиной $X_{b,T}$; $X_{b,T}$ – атмосферные осадки, формирующие расход воды Q_p .

Очевидно, что величины $J_{b,\xi}$ и $J_{b,X}$, а также их соотношение пропорциональны средневзвешенному уклону реки J_a , причём связь между указанными величинами должна отражать отклонение $J_{b,\xi}$ и $J_{b,X}$ от J_a в направлении от равнинных территорий к горным (от устья реки к ее истоку):

$$\frac{J_{b,X}}{J_{b,\xi}} = k_1 \cdot J_a^{k_2}, \quad (6)$$

где k_1 , k_2 – эмпирические коэффициенты, характерные для определённой природной зоны или комплекса природных зон. Тогда с учётом (6) приведём уравнение (3) к виду:

$$Q_p = B_b \cdot k_3 \cdot X_{b,T}^{\frac{5}{3}} \cdot J_a^{k_4} \cdot n_b^{-1}, \quad (7)$$

где $k_3 = k_1^{0,5}$; $k_4 = 0,5 \cdot k_2$.

Таким образом, метод определения характерного расхода воды сводится к предварительному определению параметров k_3 и k_4 для определённой природной зоны (или сходных по условиям формирования стока природных зон) и последующему

использованию (7) для расчёта гидрологически неизученных рек.

Апробация метода

Для оценки качества предлагаемого подхода к определению характерных расходов воды использовались данные сети станций Росгидромета об атмосферном увлажнении водосборов и расходах (среднегодовых, максимальных, минимальных) воды в створах рек бассейна Оби (р. Томь – г. Междуреченск; р. Уса – г. Междуреченск; р. Мрас-Су – г. Мыски; р. Кондома – с. Кузедеево; р. Белый Июс – п. Малая Ссыя; р. Урюп – с. Изындаево; р. Четь – с. Усачёво; р. Яя – пгт. Яя; р. Чичка-Юл – п. Франца; р. Улу-Юл – п. Аргат-Юл; р. Чая – с. Подгорное; р. Кеть – п. Максимкин Яр; р. Пайдугина – с. Березовка; р. Парабель – с. Новиково; р. Васюган – с. Средний Васюган; р. Тым – с. Напас; р. Большой Юган – с. Угут; р. Тара – с. Муромцево; р. Демьянка – юрты Лымковские; р. Северная Сосьва – с. Няксимволь; р. Полуй – п. Полуй; р. Надым – г. Надым) [1–6, 10].

В случаях, когда расположение метеостанции, с учётом рекомендаций [10], не соответствовало геометрическому центру водосбора, характеристика атмосферного увлажнения водосбора рассчитывалась как средневзвешенное (по расстоянию) по данным ближайших метеостанций.

Параметры уравнения (7) определялись по методу наименьших квадратов через ее

линеаризирование путем логарифмического преобразования:

$$z_1 = \ln(J_a) \text{ и } z_2 = \ln \left(\frac{Q_{b,T} \cdot n_b}{B_b \cdot X_{b,T}^3} \right). \quad (8)$$

Тогда уравнение (7) трансформируется в линейную зависимость вида:

$$z_2 = k_1^* \cdot z_1 + k_2^*, \quad (9)$$

где $k_1^* = \ln(k_4)$; $k_2^* = \ln(k_3)$.

Статистическая значимость регрессионной зависимости, согласно [9], оценивалась исходя из выполнения следующих неравенств:

$$R^2 > 0,36; \quad k_i^* > 2\delta(k_i^*),$$

где R^2 – квадрат коэффициента корреляции; $\delta(k_i^*)$ – погрешность определения k_i^* ; k_i^* – коэффициент регрессии в уравнении (9).

При оценке подземной составляющей речного стока использовался способ, изложенный в [7].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о допустимости применения описанного выше подхода к оценке характерных расходов воды (таблица) как для целей обоснования проектов водозащитного строительства, так и для палеогеографических реконструкций с использованием геоботанических индикаторов атмосферного увлажнения.

Результаты оценки параметров уравнения связи характерных расходов воды и атмосферного увлажнения

Характерный расход воды Q_p	Характеристика атмосферного увлажнения $X_{b,T}$	Параметры уравнения (7)			Сравнение фактических* и расчётных расходов воды	
		k_3	k_4	R^2	r	δ_r
Среднегодовой	Сумма осадков за год	0,785	-0,353	0,68	0,89	0,04
Максимальный весеннего половодья обеспеченностью 1%	Сумма осадков за ноябрь – апрель	78,09	-0,345	0,55	0,80	0,07
Минимальный зимний среднемесячный обеспеченностью 80%	Сумма осадков за июнь – октябрь	0,145	-0,610	0,71	0,81	0,07
Среднегодовой подземный	Сумма осадков за июнь – октябрь	0,302	-0,506	0,71	0,84	0,06

Примечания: * под «фактическим» понимается расход воды, вычисленный согласно [9]; при апробации способа использовались значения расходов воды Q_p в м³/с, характеристик атмосферного увлажнения $X_{b,T}$ – в мм/период, уклона J_a – в м/км; r – коэффициент парной корреляции между фактическими и расчётными значениями характерных расходов воды; δ_r – ошибка коэффициента корреляции.

Проверка на независимом материале показала, что относительное отклонение расчётных значений максимального и подземного стока от их фактических величин в среднем составляет -18% и +18% соответственно.

Необходимо отметить, что предлагаемый в данном методе подход для определения

характерных расходов воды не работает для рек с промерзающим руслом и аридных зон. Тем не менее, для рек гумидных областей Северной Евразии (в областях с большой заболоченностью водосборов), после проведения более тщательного районирования водосборов по величинам k_3^* , k_4^* и n_i – метод

актуален и будет востребован, особенно при проведении изысканий. Особо следует отметить возможности изложенного метода в части нахождения доли грунтового питания рек при оценке ресурсов подземных вод. Его использование позволяет существенно упростить состав и объём гидрогеологических исследований и снизить их стоимость.

При палеогеографических реконструкциях, в частности, предлагаемый подход найдет применение при анализе условий формирования гидрогенных месторождений полезных ископаемых, например, осадочных железных руд в Западной Сибири.

Закключение

Предложен метод определения характерных (среднепогодных, максимальных, минимальных) расходов воды, а также подземной составляющей речного стока при отсутствии данных наблюдений. Он основан на использовании уравнения равномерного установившегося движения потока и схематизации речного потока: шириной, равной средней ширине водосбора; глубиной, пропорциональной атмосферному увлажнению; уклоном, пропорциональном средневзвешенному уклону речного русла.

Использование метода позволяет решить ряд вопросов как фундаментального, так и прикладного характера. В частности, при количественной оценке соответствия геоботанических характеристик (например, абсолютное и относительное содержание остатков гидрофильных растений) атмосферному увлажнению появляется возможность восстановить гидрологические условия в различные геологические эпохи. Одной из потенциальных возможностей предлагаемого подхода является разработка методик гидрологических прогнозов (в том числе с использованием методов дистанционного зондирования Земли), а также обоснование схем гидрологического районирования территорий с учётом основных стокоформирующих факторов, численно выраженных параметрами уравнения (7).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-05-98045 р_сибирь_а.

Список литературы

1. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1985 г. Ч. 1. Реки и каналы. Т.1. Вып. 10. РСФСР. Бассейны Оби, Надыма, Пура, Таза. – Новосибирск: ЗСУГМС, 1987. – 570 с.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 718 с.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб.: Гидрометеоздат, 1998. – 702 с.
4. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.Г. Шурупа. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 488 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 408 с.

6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / под ред. В.Е. Водогрецкого. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 423 с.

7. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби // Мелиорация и водное хозяйство. – 2010. – № 1. – С. 36–39.

8. Савичев О.Г. Методика расчёта максимальных расходов речных вод в таёжной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 140–144.

9. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.

10. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: Минрегион России, 2012. – 264 с.

11. Kidson R.L., Richards K.S., Carling P.A. Hydraulic model calibration for extreme floods in bedrock-confined channels: case study from northern Thailand // Hydrological processes. – 2006. – № 20. – Pp. 329–344.

12. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.

13. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a Changing Climate. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.

References

1. Ejegodnye dannye o regime i resursach poverchnostnykh vod suschi. 1985 g. Ch. 1. Reki i kanaly. Vol. 1. Iss. 10. RSFSR. Basseiny Obi, Ndyama, Pura, Tazaa. Novosibirsk, ZSSUGMS, 1987. 570 p.
2. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. S. 3. Mnogoletnye dannye. Ch. 1–6. Iss. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altaisky krai. SPb., Hydrometeoizdat, 1993. 718 p.
3. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. S. 3. Mnogoletnye dannye. Ch. 1–6. Iss. 17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti. SPb., Hydrometeoizdat, 1998. 702 p.
4. Osnovnye hydrologicheskie charakteristiki. Vol. 15. Altai, Zapadnaya Sibir i Severnyy Kazachstan. Iss. 1. Verchnyaya i Srednyaya Ob, pod red. E.G. Schurupa. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1979. 488 p.
5. Resursy poverchnostnykh vod SSSR. Vol. 15. Altai i Zapadnaya Sibir. Iss. 2. Srednyaya Ob, pod red. N.A. Paninnoi. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1972. 408 p.
6. Resursy poverchnostnykh vod SSSR. Vol. 15. Altai i Zapadnaya Sibir. Iss. 3. Nizhnii Irtysh i Nizhnaya Ob, pod red. V.E. Vodogreckogo. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1973. 423 p.
7. Savichev O.G., Podzemnaya sostavlyayuchaya stoka rek basseina Srednei Obi. Melioraciya i vodnoe chozyaistvo. 2010, no. 1, pp. 36–39.
8. Savichev O.G., Metodika rascheta maximalnykh raschodov vod v taegnoi zone Zapadnoi Sibiri. Izvestia Tomskogo polytechnicheskogo universiteta. 2011. Vol. 318, no. 1, pp. 140–144.
9. SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnykh raschetnykh hydrologicheskikh charakteristik. Moscow, Gosstro Rossi, 2004. 72 p.
10. SP 131.13330.2012. Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannay redactia SNiP 23-01-99*. Moscow, Minregion Rossii, 2012. 264 p.
11. Kidson R.L., Richards K.S., Carling P.A., Hydraulic model calibration for extreme floods in bedrock-confined channels: case study from northern Thailand. Hydrological processes. 2006, no. 20, pp. 329–344.
12. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
13. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a Changing Climate. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.

Рецензенты:

Земцов В.А., д.г.н., профессор, заведующий кафедрой гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск;

Севастьянов В.В., д.г.н., доцент, профессор кафедры метеорологии и климатологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.