

Физико-географические исследования

УДК 556.536.012

Н.Б. Барышников, Д.И. Исаев, В.М. Сакович

МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ РУСЛОПОЙМЕННЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Приведены результаты анализа методов расчетов средних скоростей и пропускной способности русел и пойм в условиях потепления климата. Показано несовершенство методов, основанных как на формулах Шези и Маннинга, так и на статистических методах. Применение последних, как известно, ограничено необходимостью стационарности процессов, что при потеплении климата не сохраняется. Изменение, вернее потепление климата, привело к существенному увеличению частоты и особенно мощности катастрофических паводков как на территории Европы, так и на азиатской территории. Учитывая такое положение, был выполнен анализ паллиативных методов, в частности, эмпирических, основанных на натурной информации и сведениях о максимальных уровнях воды. На его основе был рекомендован для использования метод, разработанный в РГГМУ, основанный на графической зависимости относительных скоростей от относительных глубин и угла α между динамическими осями взаимодействующих потоков. Аналогичные исследования и анализ методов были выполнены с целью совершенствования методики расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, находящихся под воздействием потоков поймы. На этой основе рекомендована методика расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, основанная на графических зависимостях поправок к скоростям, обусловленных влиянием эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков, отражаемого углом между динамическими осями взаимодействующих потоков.

Ключевые слова: климат, русло, пойма, угол α , эффект взаимодействия потоков, прирусловой вал, прорва, грива.

Значительная часть территории России является равнинной и протекающие по ней реки имеют поймы, поэтому максимальные расходы воды на реках России, как правило, проходят по затопленным поймам. Изменение, вернее потепление, климата привело к существенному увеличению частоты и особенно мощности катастрофических паводков как на территории Европы, так и на азиатской территории. В конце прошлого и начале текущего столетия мощные катастрофические паводки, расходы которых, как правило, превышали максимальные расходы 1 % обеспеченности, наблюдались практически на реках всех европейских государств. Такое же положение характерно и для азиатского континента. Не обошли эти паводки и Россию. В качестве примера достаточно привести р. Амур, где в 2013 г. прошел катастрофический паводок. Измеренные максимальные расходы воды на гидростворках у городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре составили 44,0 и 46,0 тыс.м³/с. Этот паводок привел к большому экономическому ущербу в 95 млрд руб. (по предварительным данным). Не лучше обстояло дело и на юге европейской территории России. Катастрофические паводки большой мощности, принесшие значительный экономический ущерб, прошли в бассейне реки Кубани, на реках Ставропольского края, Волгоградской области и в других регионах России.

Объект и методы исследований

Учитывая, что в России продолжается активное гидротехническое строительство, в частности мостовых переходов и различных трубопроводов, пересекающих реки, остро встает вопрос об обеспечении такого строительства необходимой гидрологической информацией, в первую очередь сведениями о максимальных расходах воды различной обеспеченности. Для получения такой информации необходимо преодолеть значительные трудности. В частности, из-за изменения климата ряды наблюдений за речным стоком становятся неоднородными, что вызывает необходимость совершенствования других паллиативных методов, одним из которых является методика расчетов максимальных расходов воды, основанная на данных по характерным морфостворам и сведениям о метках высоких вод.

Однако при реализации этого метода возникают свои дополнительные трудности. Если при расчетах используются данные по беспойменному створу, то применение для расчетов формул Шези и Маннинга или Шези и Павловского и других вполне допустимо, так как в этом случае движение воды будет квазиравномерным. Контрольные расчеты, выполненные в свое время в РГГМУ на основе дан-

ных по 504 гидростворам [1], показали, что погрешности расчетов составили 30–35 % в зависимости от используемой таблицы для определения коэффициентов шероховатости (Срибного, Карасева или Чоу. Такие значения погрешности считаются допустимыми. К сожалению, при использовании этой методики велика доля субъективизма при установлении значений параметров используемых уравнений.

Результаты и их обсуждение

Значительно сложнее применение данной методики к пойменным створам. Действительно, после деления гидроствора и водного потока на русловую и пойменную составляющие расчет расходов воды также рекомендуется осуществлять на основе концепции равномерного движения, что не соответствует реальному движению как русловых, так и пойменных потоков. Исследования В.Н. Гончарова [5], Н.Б. Барышникова [2; 3] и других авторов [6; 7 и др.] показали, что при взаимодействии таких потоков возникает эффект, названный Г.В. Железниковым [6] кинематическим, приводящий к резкому изменению, иногда в разы, средних скоростей взаимодействующих потоков.

Необходимо рассмотреть какие же имеются методы расчетов и какие рекомендуются для определения скоростей пойменных составляющих потоков и пропускной способности пойм.

На кафедре гидрометрии РГТМУ во второй половине прошлого столетия была разработана и стала развиваться методика расчетов средних скоростей русловых составляющих потоков, взаимодействующих с пойменными потоками, основанная на натурной информации и эмпирической графической зависимости вида $v_p/v_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ [3], (рис.1).

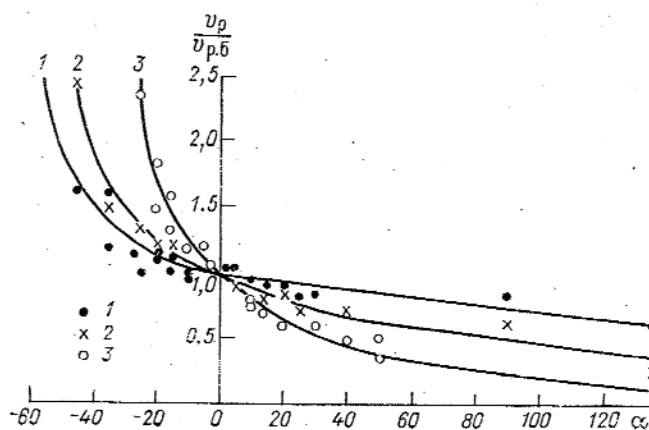


Рис. 1. Кривые $v_p/v_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$: 1 – $h_p/h_{p,б} = 1,10$; 2 – $h_p/h_{p,б} = 1,25$; 3 – $h_p/h_{p,б} = 1,50$

Здесь v_p , $v_{p,б}$ и h_p , $h_{p,б}$ – средние скорости и глубины. Индекс «р» свидетельствует о том, что данные величины относятся к русловому потоку, индекс «р.б» – к тому же потоку, но при уровне затопления бровки прируслового вала. Параметр α – угол между взаимодействующими потоками, приравненный углу между геометрическими осями русла и поймы.

На рисунке условно принято, что при положительных углах пойменный поток вторгается в русловую составляющую, создавая подпор и тем самым уменьшая его скорости. При отрицательных углах α наблюдается противоположное явление, то есть растекание масс руслового потока по пойме, что приводит к увеличению уклонов, а, следовательно, и скоростей руслового потока.

Как видно на рисунке, средние скорости руслового потока интенсивно изменяются при изменении угла α и глубины потока. Сложность при использовании этого метода вызывает необходимость расчета средних скоростей русловой составляющей потоков при уровнях затопления бровок прирусловых валов $v_{p,б}$ при отсутствии данных натурных наблюдений. Их величины рекомендуется рассчитывать, основываясь на допущении о равномерности движения при этих уровнях $h_{p,б}$, то есть опять же на основе формул Шези и Маннинга или аналогичных им, что может привести к дополнительным погрешностям расчетов. Следует отметить и сложность определения отметки бровки прируслового вала, в частности из-за растительности, особенно древесной, которая существенно снижает проявление эффекта взаимодействия потоков.

Это положение можно проиллюстрировать данными наблюдений за максимальными расходами воды на р. Луге у пос. Толмачево (рис. 2).

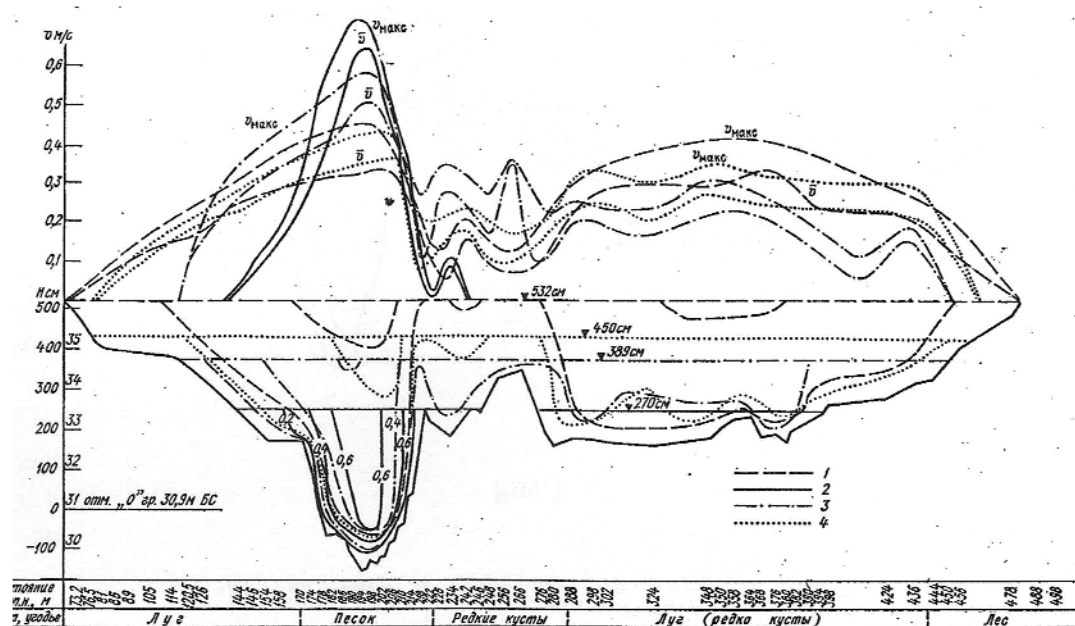


Рис. 2. Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги – пос. Толмачево

Примечание. Данные измерений 1977 г. при уровнях: 1 – 532 см, 2 – 450 см, 3 – 389 см, 4 – 270 см.

Как видно на рис. 2, при наивысшем уровне 532 см, соответствующем максимальному расходу воды в русле, и пойме, наблюдаются примерно одинаковые средние скорости и расходы воды руслового и пойменного потоков. Эти два потока разделяет четко выраженный прирусловой вал, интенсивно заросший растительностью. По-видимому, этот заросший вал существенно снижает эффективность взаимодействия соседних потоков.

Значительно сложнее расчет пойменной составляющей потока. Как известно, в природных условиях наиболее часто встречаются поймы, соответствующие типу руслового процесса «свободное меандрирование» [9; 10]. Затопление таких пойм, как правило, начинается с низовых прорывов. Их поверхность характеризуется наличием грив, разделяющих единый пойменный поток на межгривные составляющие. При этом в начале процесса затопления направление течения этих потоков в межгривных отсеках противоположно по направлению течению руслового потока. Процесс резко изменяется при поступлении воды на пойму через верховые прорывы. При дальнейшем подъеме уровня на пойме формируется единый пойменный поток. Его взаимодействие с русловым потоком осуществляется на участке различной ширины поймы, но не превышающей шести ширин русла по данным Г.В. Железнякова [6]. Эти данные были получены им при модельных испытаниях потоков в русле с гладкой, выложенной бетоном, поймой. В натуральных условиях, по данным Н.Б. Барышникова [3], ширина участка, на котором ощущается воздействие руслового потока на пойменный, значительно меньше, изменяясь от 4-5 до одной ширины русла в зависимости от состояния прируслового вала и растительности на нем. Поэтому методика расчетов гидравлических характеристик речных потоков с поймами может быть в настоящее время разработана только для условий единого руслопойменного потока. Необходимо при этом отметить, что в натуральных условиях на пойму обычно поступают верхние слои руслового потока, обладающие высокими скоростями, значительно превышающими скорости, соответствующие условиям шероховатости поймы. Это приводит к тому, что при использовании методики расчетов, основанной на концепции равномерного движения, то есть формулах Шези и Маннинга, расчетные значения коэффициентов шероховатости получаются существенно заниженными (в 2-3 раза), составляя величину 0,012–0,014 [2; 3]. При том, что их минимальные табличные значения составляют величины 0,025–0,030, то есть примерно в два раза больше.

При определении скоростей пойменной составляющей потока и пропускной способности поймы прежде необходимо оценить вес пойменной составляющей в руслопойменном потоке. Н.Б. Барышниковым [3] по данным сетевых станций в системе Росгидромета установлено, что доля пойменной составляющей может достигать 80–90 % от общего максимального расхода воды. При этом необ-

ходимо учитывать то, что сетевые станции располагаются на нетипичных с позиции руслового процесса наиболее узких участках русел [10]. В целом же пойменная составляющая может достигать 100 % расхода воды. Ярким примером этого являются данные измерений сотрудников ГГИ на реке Оби у г. Барнаула [4], когда русло при его пересечении пойменным потоком под углом, близким к 90° , было полностью заполнено наносами, которые через прорвы и другие понижения в прирусловом вале стали поступать на пойму.

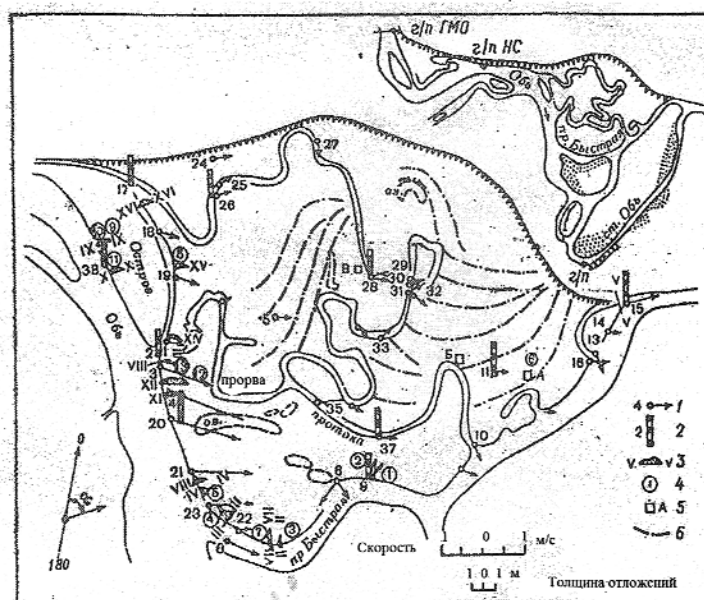


Рис. 3. План пойменного массива и схема участка р. Оби

Примечание. 1 – векторы поверхностных скоростей на пике половодья, 2 – водомерные посты, 3 – характерные профили отложения наносов на пойме, 4 – места отбора проб донных отложений, 5 – границы полигонов, 6 – береговые валы.

Хотя движение пойменного потока существенно отличается от равномерного, основным методом расчетов средних скоростей и максимальных расходов воды является метод, основанный на концепции равномерного движения [7]. Это приводит к большим погрешностям расчетов.

Для повышения точности расчетов Б.В. Поляковым [8] ранее была разработана методика, основанная на делении поймы на отсеки по вершинам пойменных грив с последующим вычислением средних скоростей и расходов воды этих потоков и суммированием последних для определения расхода воды пойменного потока в целом. Безусловно, при таком подходе практически почти все недостатки методики расчетов параметров пойменного потока в целом сохраняются.

Существенным недостатком описываемых методов является отсутствие возможности учета уклона водной поверхности в связи с отсутствием сведений об уклоне водной поверхности пойменных потоков. Более того, даже отсутствует методика их измерений.

Поэтому на кафедре гидрометрии РГГМУ на основе анализа натурной информации по свыше чем 100 рекам бывшего Советского Союза была выполнена попытка разработки методики расчетов пойменной составляющей потока, в основу которой были положены аналитические зависимости

$$\frac{Q_n}{Q_n + Q_p} = f\left(\frac{B_n}{B_n + B_p}, \frac{n_n}{n_p}\right) \text{ или } \frac{Q_n}{Q_n + Q_p} = f\left(\frac{F_n}{F_n + F_p}, \frac{n_n}{n_p}\right).$$

Последняя зависимость предложена в виде графика (рис. 4) как для условий подъема, так и спада уровней воды.

Как видно на рис. 4, пойменные составляющие потока убывают при увеличении относительной шероховатости поймы как при подъеме, так и при спаде уровней.

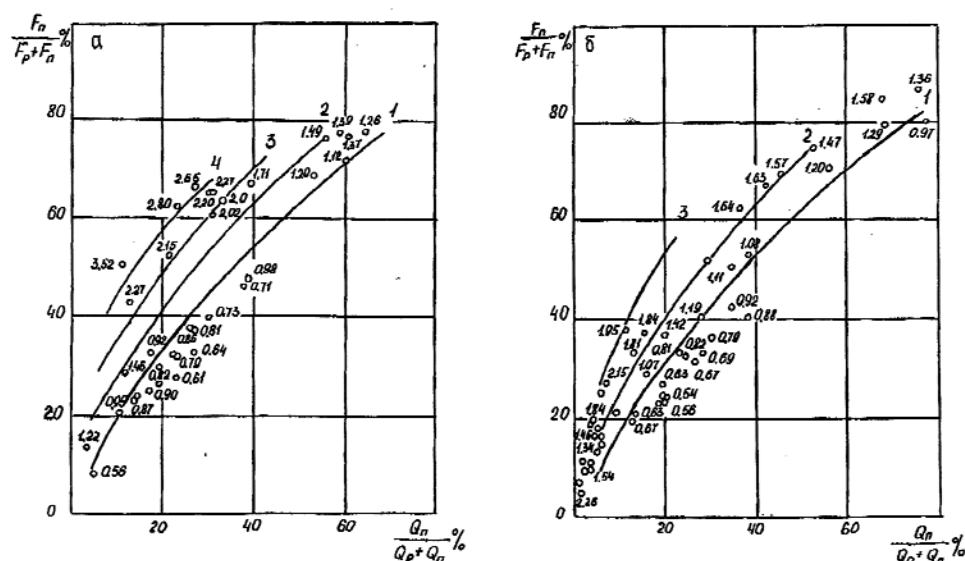


Рис. 4. Кривые $Q_n/(Q_p+Q_n)=f(F_n/(F_p+F_n), n_n/n_p)$ (по С.Л. Галактионову);
 а и б – соответственно третей и второй типы взаимодействия потоков.
 Около точек значения n_n/n_p : 1 – $n_n/n_p=1,0$; 2 – $n_n/n_p=1,5$; 3 – $n_n/n_p=2,0$; 4 – $n_n/n_p=2,5$

К сожалению, имеющиеся у гидрологов в настоящий момент времени методы не учитывают влияние современных климатических изменений на максимальные расходы воды в реках. В связи с этим необходима разработка новых подходов к решению проблемы определения гидравлических параметров речных пойменных потоков.

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы и предложения:

- рекомендуемая СНИПом методика расчетов средних скоростей и максимальных расходов воды на пойменных морфостворгах, основанная на формулах Шези и Маннинга и аналогичных им, приводит к большим, превышающим допустимые погрешности, результатам расчетов;
- разработанные в РГГМУ методы расчетов средних скоростей взаимодействующих потоков и пропускной способности русел и пойм существенно уменьшают погрешности расчетов, но требуют доработки на большем объеме натурной информации;
- необходима разработка принципиально новых методов расчетов средних скоростей русловых и пойменных потоков и пропускной способности русел и пойм.

Для решения задачи по совершенствованию методов расчета характеристик пойменных потоков необходима организация специальной программы по проведению гидрологических обследований пойменных рек в период и после прохождения экстремально больших половодий и паводков для формирования базы натурных данных, что позволит провести более глубокое изучение и анализ процесса. Инициатором разработки такой государственной программы, по всей видимости, должен являться РОСГИДРОМЕТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 152 с.
2. Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Скоморохова Е.М., Поташко Е.А. Коэффициенты шероховатости пойм // Уч. зап. РГГМУ. 2012. Вып. 23. С. 13-20.
3. Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012. 426 с.
4. Великанова З.М., Ярных Н.А. Натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье // Тр. ГГИ, 1970. Вып.183. С. 33-53.
5. Гончаров Н.Б. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 375 с.
6. Железняков Г.В. Пропускная способность русел, каналов и рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 310 с.

7. Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
8. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 480 с.
9. Попов И.В., Кочаненкова Н.П. О морфологических особенностях речных пойм // Тр. ГГИ, 1972. Вып. 190. С. 19-36.
10. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Тр. ГГИ, 1965. Вып. 128. С. 23-96.

Поступила в редакцию 24.12.2018

Барышников Николай Борисович, доктор географических наук, профессор кафедры гидрометрии

E-mail: kafedra_gm@rshu.ru

Исаев Дмитрий Игоревич, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой гидрометрии

E-mail: kafedra_gm@rshu.ru

Сакович Владимир Михайлович, кандидат географических наук, доцент,

декан гидрологического факультета

E-mail: dekanat_gf@rshu.ru

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79

N.B. Baryshnikov, D.I. Isaev, V.M. Sakovich

MAXIMUM WATER RATES CALCULATION METHODS FOR THE FLOODPLAIN FLOWS IN THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE

The paper gives the results of the analysis of methods of calculation of average speeds and throughput of beds and floodplains in the conditions of climate warming. The imperfection of the methods based both on formulas of Shezi and Manning, and on statistical techniques is shown. Application of the last, as we know, is limited by the need for stationary of processes that when warming climate does not remain. Change, or rather, warming of climate, led to significant increase in frequency and especially in the power of catastrophic floods both in the territory of Europe and in the Asian territory. Considering such situation, the analysis of palliative methods, in particular, empirical based on natural information and data on the maximum levels of water, was made. On its basis, the method developed in RGGMU based on graphic dependence of relative speeds on relative depths and a corner α between dynamic axes of the interacting flows is recommended for use. Similar researches and analysis of methods were executed for the purpose of improvement of a technique of calculation of average speeds of channel components of the flows which are under the influence of flood plain flows. On this basis, a technique of calculation of averages on verticals of speeds of channel components of flows based on graphic dependences of the corrections to speeds caused by influence of effect of the interaction of channel and inundated flows reflected by a corner between dynamic axes of the interacting flows is recommended.

Keywords: Climate, Riverbed, Floodplain, Alpha Angle, Flows Interaction Effect, Riparian Levee, Cut-off, Low Ridge.

REFERENCES

1. Baryshnikov N.B. *River floodplains* [Rechnye pojmy], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 152 p. (in Russ.).
2. Baryshnikov N.B., Subbotina E.S., Skomorokhova E.M., Potashko E.A. [Koefficienty sherohovatosti pojmy] in *Uchenye Zapiski Russ. State Hydrometeorol. Univ.*, St. Petersburg, 2012, iss. 23, pp. 13-20 (in Russ.).
3. Baryshnikov N.B. *Problems of Morphology, Hydrology and Hydraulics of Floodplains* [Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki pojmy], SPb.: izd. RGGMU, 2012, 426 p. (in Russ.).
4. Velikanova Z.M., Yarnykh N.A. [Naturnye issledovaniya gidravliki pojmennogo massiva v vysokoe polovod'e] in *Trudy GGI*, 1970, iss. 183, pp. 33-53 (in Russ.).
5. Goncharov V.N. *Dynamics of Riverbed Flows* [Dinamika ruslovykh potokov.], L.: Gidrometeoizdat, 1962, 375 p. (in Russ.).
6. Zheleznyakov G.V., *Discharge Capacity of Channels and River Beds* [Propusknaya sposobnostj rusel, kanalov i rek], L.: Gidrometeoizdat, 1981, 310 p. (in Russ.).
7. Karasyov I.F. *River Hydrometry and Accounting of Water Resources Beds* [Rechnaja gidrometrija i uchjot vodnyh resursov], L.: Gidrometeoizdat, 1980, 310 p. (in Russ.).
8. Polyakov B.V. *Hydrologic Analysis and Calculations* [Gidrologicheskij analiz i raschety], L.: Gidrometeoizdat, 1948, 480 p. (in Russ.).
9. Popov I.V., Kochanenkova N.P. [O morfologicheskikh osobennostjah rechnykh pojmy] in *Trudy GGI*, 1972, iss. 190, pp. 19-36 (in Russ.).

10. Skorodumov D.E. [Voprosy gidravliki pojmennyh rusel v svjazi s zadachami postroenija i ekstrapoljicii krivyh rasxodov vody] in *Trudy GGI*, 1965, iss.128, pp. 23-96 (in Russ.).

Received 24.12.2018

Baryshnikov N.B., Doctor of Geography, Professor at Department of Hydrometry

E-mail: kafedra_gm@rshu.ru

Isaev D.I., Candidate of Geography, Associate Professor, Head of the Department of Hydrometry

E-mail: kafedra_gm@rshu.ru

Sakovich V.M., Candidate of Geography, Associate Professor, Dean of Hydrology Faculty

E-mail: dekanat_gf@rshu.ru

Russian State Hydrometeorological University

Voronezhskaya st., 79, Saint-Petersburg, Russia, 192007