

УДК 556.5

*А.О. Миннегалиев***ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ ОТ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСБОРОВ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА Р. БЕЛОЙ)**

Для водотоков бассейна реки Белой выполнена оценка зависимости средней продолжительности весеннего половодья от морфометрических характеристик водосборов. Исходными данными послужили материалы наблюдений на 86 гидрологических постах. На основании регрессионного анализа составлено три уравнения: одно для равнинной зоны и два для районов горной зоны. В качестве предикторов использованы площадь водосбора, длина водотока, координаты центров тяжести, экспозиция, уклон склонов. Установлено, что продолжительность половодья зависит от площади, местоположения и уклона склонов водосбора. Достоверность полученных зависимостей составляет 84,2–84,4 %, стандартная ошибка – 3,2–5,7 суток. Несмотря на эмпирический характер, полученные уравнения позволяют выполнять ориентировочные расчеты средней многолетней продолжительности весеннего половодья на неизученных водотоках исследуемой территории.

*Ключевые слова:* весеннее половодье, продолжительность половодья, бассейн р. Белой, регрессионный анализ.

Важной прикладной задачей гидрологических исследований является расчет характеристик стока весеннего половодья. Эти характеристики используются при обосновании проектных решений на всех объектах, каким-либо образом сопрягающихся с водотоками. Весеннее половодье – сложный процесс, формирующийся под действием целого ряда факторов: климатических, геологических, антропогенных и др. Сочетание этих факторов определяет величину основных характеристик периода талого стока: максимального срочного расхода, суммарных слоев стока, объема стока, дат начала, пика и конца. Как правило, наиболее изученными из указанных параметров являются максимальный срочный расход и суммарный слой стока, использующиеся в сложившейся практике гидрологических расчетов как основные характеристики при расчетах максимального талого стока водотоков.

В то же время характерные даты и продолжительность половодья не рассматриваются подробно, несмотря на то, что эти параметры используются при построении гидрографов стока половодного периода и оценке параметров формул объемного типа. От длительности фазы также косвенно зависит степень, продолжительность и характер затопления пойм, которые являются важным признаком, определяющим, с одной стороны состояние экосистем пойменных массивов, с другой – возможные ограничения на строительство или условия работы капитальных сооружений на периодически затопляемых участках.

Для изучаемого авторами объекта – бассейна р. Белой – проблема неравномерной изученности временных и количественных параметров половодья является также актуальной. Бассейн в отношении максимального талого стока является изученным достаточно. Для изучаемой территории на базе кафедры гидрологии и геоэкологии географического факультета БашГУ под руководством А.М. Гареева выполнен ряд работ, в том числе: по оценке значимости стокоформирующих факторов половодья [1]; по выявлению зависимостей весеннего стока от определяющих параметров и построению региональных моделей расчета стока [2]. В настоящее время на основании этих работ для бассейна в пределах Башкирского Предуралья создается методика расчетов максимального стока. Напротив для временных параметров половодья имеются лишь отдельные материалы, к примеру, для бассейна р. Белой в пределах территории республики Башкортостан создана картосхема [3] сроков начала половодья. В связи с недостаточной изученностью временных параметров талого стока в данной работе авторами выполнена оценка зависимости средней многолетней продолжительности половодья от морфометрических характеристик водосборов.

**Объект и методы исследований**

В качестве объекта изучения выделена территория бассейна р. Белой – крупного притока р. Кама, протекающего по территориям Челябинской области и республики Башкортостан. Река Белая является типичным крупным водотоком со смешанным (горным – в верхнем течении, равнинным – в среднем и нижнем течении) характером питания. Водотоки бассейна характеризуются выраженным весенним половодьем, низкой зимней и средней летней меженью, прерываемой дождевыми паводками.

Исходными данными послужили опубликованные материалы наблюдений на гидрологических постах [1-4], расположенных преимущественно в пределах исследуемого бассейна. Кроме того, для периода с 1980 по 2010 г. использованы неопубликованные фондовые материалы ФГБУ «Башкирское УГМС» и кафедры гидрологии суши и геоэкологии Башкирского государственного университета. С целью экстраполяции наблюдений в крайние западные точки водосбора дополнительно использованы материалы наблюдений на четырех постах водосбора Нижнекамского водохранилища (р. Ик – с. Нагайбаково, р. Ря – д. Рятамак, р. Дымка – с. Татарская Дымская, р. Усень – г. Туймазы). Продолжительность наблюдений ограничена временным промежутком с конца XIX в. до 2010 г. Предварительно отобранные данные проанализированы на наличие случайных ошибок, а также подвергнуты процедуре восстановления и проверке на однородность и стационарность. По результатам статистического анализа из совокупности постов авторами исключены ряды с малой продолжительностью, удлинить которые не удалось, а также массивы с явно нарушенным режимом половодья.

В результате отобрано 86 рядов наблюдений, для которых выполнено приведение к многолетнему периоду и определены средние продолжительности половодья. Отметим, что исходные пункты наблюдений распределены достаточно равномерно по всей территории бассейна, а расположение постов позволяет выявить основные пространственные закономерности. При этом горная часть территории характеризуется большей плотностью постов.

В качестве основного метода при выявлении зависимостей использован метод множественной линейной регрессии. Выбор предикторов выполнялся на основании предварительного графического анализа парных корреляций продолжительности и морфометрических характеристик водосборов. На предварительном этапе установлено, что часть зависимостей (например, от площади водосбора) имеют нелинейный характер. В таких случаях исходные ряды подвергались процедуре линеаризации методом логарифмирования.

Перебор позволил выделить следующие основные морфометрические факторы:

- площадь водосбора. Принята по опубликованным данным о гидрологической изученности;
- длина водотока. Принята по опубликованным данным о гидрологической изученности;
- показатели местоположения водосбора: координата  $X$  центра тяжести водосбора и координата  $Y$  центра тяжести водосбора. Координаты определены по готовым слоям водосборов с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1. Принятая система координат проекта – условная, производная от Пулково-42, получена усечением зон от координат  $X$  (-10 000 000 м) и пропорциональным усечением координат  $Y$  (-5 800 000 м). Полученные в результате преобразования значения округлены до целых километров;
- доли склонов нейтральной, северной и южной экспозиции определены по материалам SRTM с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1;
- средний уклон склонов водосбора, определен по материалам SRTM с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1;
- среднеквадратическое отклонение уклона определено по данным SRTM с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1;
- средняя высота водосбора принята по опубликованным данным о гидрологической изученности;
- среднеквадратическое отклонение средней высоты водосбора определено по данным SRTM с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1;
- показатель асимметрии водосбора, рассчитанный как соотношение правой и левой части водосбора по готовым слоям водосборов с использованием инструментов ArcGIS 9.3.1.

Регрессионный анализ предъявляет ряд требований к факторам, выступающим в качестве независимых переменных. Так, наличие связи между независимыми переменными может привести к коллинеарности. В таких случаях авторами выполнено исключение одного из предикторов. С целью недопущения коллинеарности из расчета исключены длина водотока, коррелирующая с площадью водосбора, и лесистость, коррелирующая со средней высотой. Кроме того, одновременно в расчетные зависимости не включались пары факторов: средняя высота – среднеквадратическое отклонение высоты водосбора; средний уклон склонов водосбора – средняя высота водосбора и средний уклон склонов водосбора – среднеквадратическое отклонение уклона склонов водосбора.

Попытка создания общесейновой зависимости не увенчалась успехом, разнообразие природных условий в пределах территории обусловило необходимость группировки исходных данных на предварительном этапе. В качестве основы для группировки приняты результаты гидрологического районирования, выполненного авторами [4]. При этом в границы зон и районов были внесены неко-

торые изменения в сторону их генерализации и упрощения. По условиям формирования половодья и пространственной изменчивости сроков его наступления в пределах бассейна р. Белой выделено две зоны – горная и равнинная. В границах горной зоны выделено два района: северный («Уфимский») и южный («Бельский»).

### Результаты и их обсуждение

В результате выполненных работ авторами получено три уравнения регрессии, одно для равнинной зоны и два для районов горной зоны. Описание районов и полученных уравнений приведено ниже.

**Равнинная зона.** Водосборы зоны имеют среднюю высоту не более 300 м над уровнем моря. Бассейны рек равнинной зоны слабо залесены, хорошо освоены в сельскохозяйственном отношении. Площади водосборов в створах постов колеблются в пределах 99 – 121 000 км<sup>2</sup>. В пределах зоны располагаются относительно крупные равнинные притоки р. Белой: Дема, Сюнь, Быстрый Танып, Бирь. С целью увеличения объема исходной информации к этой же зоне отнесены гидрологические посты, располагающиеся к западу от исследуемой территории на левых притоках р. Камы: р. Ик – с. Нагайбаково, р. Ря – д. Рятамак, р. Дымка – с. Татарская Дымская, р. Усень – г. Туймазы. Общее количество постов – 26.

Уравнение множественной линейной регрессии для описываемого района имеет вид:

$$T = 5.50\ln(F) + 0.044X - 0.023Y - 6.91,$$

где  $T$  – средняя продолжительность половодья, суток;

$F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

$X$  – долгота центра тяжести водосбора, км;

$Y$  – широта центра тяжести водосбора, км.

Полученное уравнение объясняет 84,4 % вариации ( $R$ -квадрат) средней длительности периода половодья. Максимальное отклонение теоретической модели от эмпирических данных составляет 9 суток, стандартная ошибка – 5 суток.

**Горная зона.** Водосборы зоны имеют среднюю высоту преимущественно более 300 м над уровнем моря. В пределах зоны выделено два района: северный – объединяющий водотоки бассейна р. Уфа и южный, включающий водотоки верхнего и горной части среднего течения р. Белой. Наряду с площадью водосбора среди основных факторов, влияющих на продолжительность половодья для горной зоны, выделены средняя высота водосбора, средний уклон водосборов и экспозиция склонов.

Северный район горной зоны («Уфимский») объединяет водотоки бассейна р. Уфа. В границы района не включены правобережные притоки от впадения р. Тюй (включительно, исключая бассейн р. Сарс) и левобережные притоки ниже впадения р. Сарва. Правобережные притоки на этом участке отнесены к равнинной зоне вследствие малых значений средней высоты водосбора. Для левобережных притоков исключение по средней высоте сделано только для бассейна р. Сарвы, притоки нижнего течения которой имеют высоты водосборов ниже 300 м. Бассейн р. Сарвы отнесен к Уфимскому району, в том числе вследствие высокой степени пораженности карстом. Остальные водотоки участка отнесены к Бельскому району по причине схожести формирования стока водотоков с малыми правыми притоками среднего течения р. Белой.

Исходными данными для построения расчетной зависимости послужили результаты наблюдений на 42 гидрологических постах. Среди особенностей морфометрических характеристик водотоков района в створах постов следует выделить достаточно высокие значения уклонов склонов, значительный разброс средних высот (от 300 до 950 м) и высокую лесистость (от 15 до 99 %), в целом закономерно возрастающую с увеличением средней высоты. Площади водосборов в створах постов колеблются в пределах 2 – 53000 км<sup>2</sup>.

Уравнение линейной регрессии для описываемого района имеет вид:

$$T = 5.15\ln(F) + 0.061X - 0.014Y + 4.43\bar{I}_B - 43.08,$$

где  $T$  – средняя продолжительность половодья, суток;

$F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

$X$  – долгота центра тяжести водосбора, км;

$Y$  – широта центра тяжести водосбора, км;

$\bar{I}_B$  – средний уклон склонов водосбора, градусы.

Расчетная зависимость отражает 84,2 % изменчивости исходных данных. Максимальное отклонение теоретической модели от эмпирических данных составляет 14 суток, стандартная ошибка – 5,7 суток.

Южный район горной зоны («Бельский») объединяет водотоки верхнего течения и правые притоки среднего течения р. Белой, а также левобережные притоки р. Уфа ниже впадения р. Сарва. Кроме того, в расчетную зависимость района с целью увеличения объема исходной информации дополнительно включены данные наблюдений на трех крупнейших транзитных створах всей исследуемой территории: р. Белой у городов Стерлитамак, Уфа и Бирск. Исходными данными для построения расчетной зависимости послужили результаты наблюдений на 21 гидрологическом посту.

Водотоки южного района в замыкающих створах гидрологических постов характеризуются довольно большими значениями средних высот водосборов (300 – 730 м) и высокой лесистостью (от 60 до 99 %), возрастающей с увеличением средней высоты. Площади водосборов в створах постов колеблются в пределах 35 – 121 000 км<sup>2</sup>.

Уравнение линейной регрессии для описываемого района имеет вид:

$$T = 2.40\ln(F) - 0,018X + 0.023Y - 078\bar{I}_B - 91,37AS_n - 73.11AS_s + 94.56,$$

где T – средняя продолжительность половодья, суток;

F – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

X – долгота тяжести водосбора, км;

Y – широта центра тяжести водосбора, км;

$\bar{I}_B$  – средний уклон склонов водосбора, градусы;

$AS_n$  – доля склонов северной и смежных инсоляционных экспозиций;

$AS_s$  – доля склонов южной и смежных инсоляционных экспозиций.

Расчетная зависимость отражает 84,3 % изменчивости исходных данных. Максимальное отклонение теоретической модели от эмпирических данных составляет 7 суток, стандартная ошибка – 3,2 суток.

Сводные по всем выделенным участкам работ результаты регрессионного анализа представлены в таблице.

### Результаты регрессионного анализа

Регрессионная статистика	Характеристика водосбора					
	ln(F)	X, км	Y, км	$\bar{I}_B$ , град.	$AS_n$	$AS_s$
Равнинная зона						
Коэффициенты	5.50	0.04	-0.02	-	-	-
Стандартная ошибка	0.69	0.02	0.01	-	-	-
t-статистика	8.03	2.86	-2.68	-	-	-
P-Значение	0.00	0.01	0.01	-	-	-
Северный район горной зоны						
Коэффициенты	5.15	0.06	-0.01	4.43	-	-
Стандартная ошибка	0.41	0.02	0.02	0.73	-	-
t-статистика	12.50	2.75	-0.71	6.10	-	-
P-Значение	0.00	0.01	0.48	0.00	-	-
Южный район горной зоны						
Коэффициенты	2.40	-0.02	0.02	-0.78	-91.37	-73.11
Стандартная ошибка	0.43	0.02	0.02	0.52	45.08	44.87
t-статистика	5.54	-0.80	1.27	-1.49	-2.03	-1.63
P-Значение	0.00	0.44	0.23	0.16	0.06	0.13

Анализ результатов расчетов показывает, что основными определяющими длительность периода половодья морфометрическими факторами для водотоков территории являются площадь водосбора и его местоположение.

Связь между площадью водосбора и продолжительностью половодья имеет логарифмический характер (рис. 1, 2). Физическая сущность этой связи заключается в закономерном возрастании разнообразия ландшафтов с увеличением площади водосбора. С одной стороны этот процесс приводит к

увеличению периода снеготаяния, с другой – к увеличению времени добегания и несовпадению центров снеготаяния и центров водосборов. Предварительный анализ средних дат начала, пика и конца для водотоков изучаемой территории показал, что увеличение средней продолжительности половодья с увеличением площади водосбора происходит в основном за счет смещения на более поздние даты конца половодья.

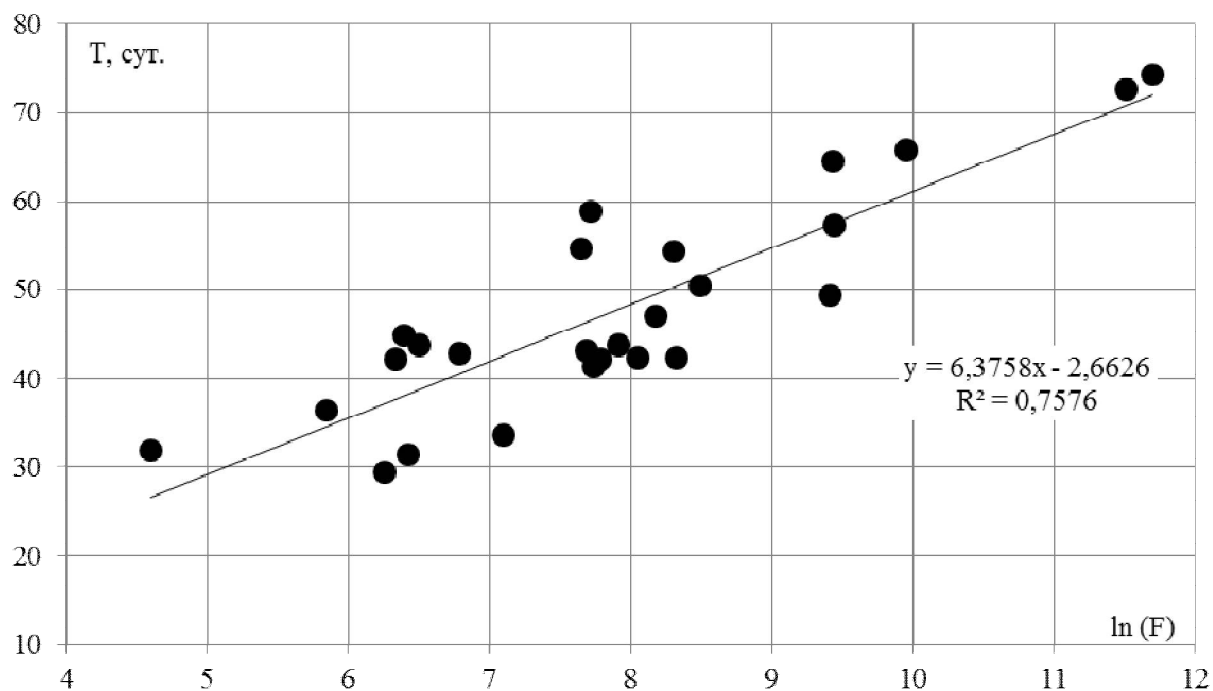


Рис. 1. Зависимость средней многолетней продолжительности весеннего половодья от площади водосбора, бассейн р. Белой, равнинная зона

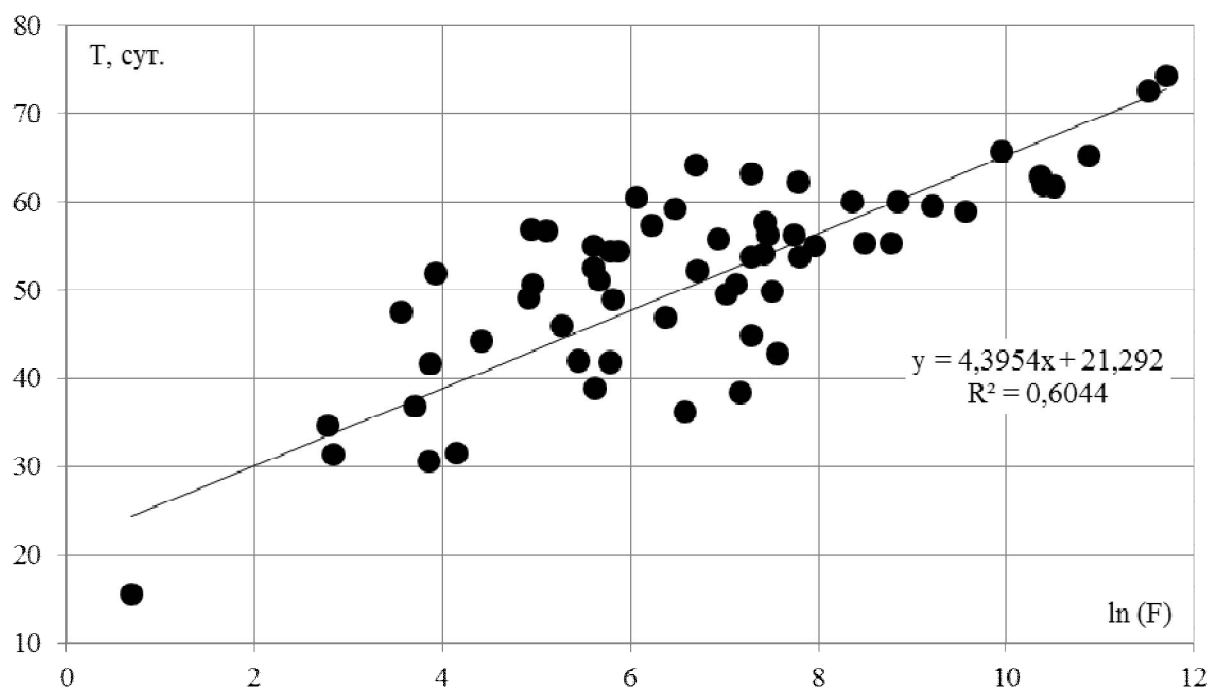


Рис. 2. Зависимость средней многолетней продолжительности весеннего половодья от площади водосбора, бассейн р. Белой, горная зона

Напротив, средняя высота, как выяснилось, на длительность половодья статистически значимого влияния не оказывает. Авторами предполагалось, что определенное значение в процессе формирования талого стока имеет не только средняя высота водосбора, но также соотношение площадей отдельных высотных зон. Эта гипотеза частично подтвердилась на предварительном этапе: как правило, на водосборах с малым «разбросом высот» таяние снега происходит быстрее, и, как следствие, половодье имеет меньшую продолжительность. В качестве параметра, описывающего вышеописанный «разброс высот», принята характеристика среднеквадратического отклонения высоты водосбора. Однако в ходе последующего регрессионного анализа статистически значимого влияния этого параметра установить не удалось. При этом для обоих районов горной зоны выделена статистически значимая зависимость от уклонов.

Кроме зависимости от площади водосбора в пределах района выделяется широтная зональность и секторность. При прочих равных условиях на водосборах, расположенных севернее, средняя продолжительность половодья меньше, чем на водосборах, расположенных южнее, а на водосборах, расположенных западнее, длительность периода талого стока меньше, чем на водосборах, расположенных восточнее. Это выводы справедливы для равнинной зоны и северного района горной зоны. Однако в пределах южного района горной зоны закономерность обратная: продолжительность половодья увеличивается с севера на юг и с востока на запад. Наряду с этим связь между координатами центров тяжести и продолжительностью для южного района горной зоны более слабая, а в расчётную зависимость добавляются доля склонов северной и южной экспозиции. Причину однонаправленной отрицательной связи с долями экспозиций, а также обратной связи с координатами центров для водотоков южного района авторам установить не удалось.

### Заключение

Для бассейна р. Белой получены зависимости средней многолетней продолжительности весеннего половодья от морфометрических характеристик водосборов. Установлено, что основными параметрами, определяющими продолжительность, являются для равнинной части территории – площадь водосбора и местоположение, выраженное через координаты центров тяжести, а для горной – площадь и уклон склонов водосбора, а также доля склонов различных экспозиций.

Полученные результаты могут быть использованы для ориентировочных расчетов средней многолетней продолжительности половодья для неизученных водотоков бассейна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гареев А.М., Зайцев П.Н. Многолетняя изменчивость условий формирования максимальных расходов воды во время весеннего половодья на малых и средних реках Башкирского Предуралья // Изв. РАН. Серия Географическая. 2016. № 3. С. 110-116.
2. Гареев А.М., Зайцев П.Н. Многолетняя изменчивость максимального стока весеннего половодья малых и средних рек Башкирского Предуралья // Вестн. Академии наук РБ. 2016. Т. 21, № 1 (81). С. 75-82.
3. Атлас республики Башкортостан / под ред. И. М. Япарова. Уфа: ГУП «ГРИ "Башкортостан"», 2005. 420 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 11. Средний Урал и Приуралье / под ред. Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 848 с.

Поступила в редакцию 12.09.2018

Миннегалиев Александр Олегович,  
старший преподаватель кафедры гидрометеорологии и геоэкологии  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»  
450076, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, 3/4  
E-mail: minnegaliev.aleksandr@rambler.ru

*A.O. Minnegaliev*

**DEPENDENCES BETWEEN AVERAGE DURATION OF SPRING FLOOD AND MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF WATERSHED (ON THE EXAMPLE OF THE BELAYA RIVER BASIN)**

An assessment of dependencies between average duration of spring floods and morphometric characteristics of watershed has been conducted for the Belaya River basin. The initial data were observations at 86 hydrological stations. Based on the regression analysis, three equations were compiled, one for the flat zone and two for the regions of the mountain zone. The predictors used were the catchment area, the length of the watercourse, the coordinates of the centers of gravity, the exposure, and the angle of slopes. It is established that the duration of flood depends on the area, location and slope of the catchment. The reliability of the dependences obtained is 84.2–84.4 %, the standard error is 3.2–5.7 days. In spite of empirical character, the equations obtained make it possible to carry out approximate calculations of the average long-term duration of spring flood on unexplored watercourses of the studied territory.

*Keywords:* spring flood, duration of flood, basin of Belaya River, regression analysis.

REFERENCES

1. Gareev A.M., Zajcev P.N. [Long-term variability of formation conditions of maximum water flow during spring floods on small and medium rivers of Baskir Pre-Urals] in *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2016. no. 3. P. 110-116 (in Russ.).
2. Gareev A.M., Zajcev P.N. [Long-term peak discharge variability during spring floods in small and medium-sized rivers of the Bashkir Cis-Urals] in *Vestnik Akademii nauk RB*, 2016. Vol. 21, no. 1 (81). P. 75-82 (in Russ.).
3. Atlas respubliky Bashkortostan [Atlas of the Republic of Bashkortostan], I. M. Yaparov (ed), Ufa: GUP «GRI «Bashkortostan», 2005. 420 p. (in Russ.).
4. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Tom 11. Srednij Ural i Priurale [Surface water resources of the USSR. Vol. 11. Middle Urals and Pre-Urals], N.M. Alyushinskaya (ed), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 848 p. (in Russ.).

Received 12.09.2018

Minnegaliev A.O.,  
senior Lecturer at Department of hydrology and geocology  
Bashkir State University  
K. Marksa st., 3/4, Ufa, Russia, 450076  
E-mail: minnegaliev.aleksandr@rambler.ru