

К вопросу о влиянии рельефа на сток рек Воткинского водохранилища

В. Г. Калинин*, С. В. Пьянков*

Рассматриваются вопросы влияния поверхности водосборов на сток рек. На основе цифровых моделей рельефа выявлены закономерности формирования стока в зависимости от предложенных авторами коэффициентов расчлененности рельефа.

Поверхность водосбора играет весьма существенную роль в процессах формирования речного стока, и в первую очередь облик поверхности водосбора определяется рельефом [2, 4, 5, 9, 12]. Рельеф бассейна обуславливает перераспределение поступающих потоков тепла и влаги, определяет густоту заложения речной сети, степень и скорость разгрузки речных бассейнов от выпавших осадков и талых вод.

При исследовании влияния рельефа на сток рек наибольший интерес представляет его горизонтальная и вертикальная расчлененность, определяющая условия дренирования грунтовых вод [5, 6]. Показателем горизонтальной расчлененности рельефа обычно является коэффициент густоты речной и овражно-балочной сети, а в качестве показателя вертикальной расчлененности часто используется глубина вреза речных долин и русел [11]. Однако роль этих показателей оценивается обычно раздельно. В [6] предложен комплексный показатель расчлененности рельефа

$$K_e = \frac{2Lh\Sigma l}{A^2}, \quad (1)$$

где A — площадь водосбора (км^2), L — длина речной и овражно-балочной сети (км), h — высота сечения рельефа на картах, Σl — длина горизонталей (км). Составляющие этой формулы могут использоваться для выражения отдельно горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа:

$$r = \frac{A}{2L}, \quad (2)$$

$$h_g = r \operatorname{tg} \alpha = \frac{h\Sigma l}{2L}, \quad (3)$$

где α — средний угол наклона поверхности водосбора (град). Следует отметить, что указанные коэффициенты представляют собой величину, обратную коэффициенту густоты речной сети. Они были использованы для

* Пермский государственный университет.

установления зависимостей с минимальным зимним среднемесячным стоком рек в пределах горного и равнинного речных бассейнов Западной Сибири, полученные связи достаточно тесные [6]. Но эти исследования не получили дальнейшего развития, поскольку определение составляющих коэффициентов традиционным способом, таких как сумма длин горизонталей в пределах бассейнов рек, — очень трудоемкая задача. Для рек водосбора Воткинского водохранилища эти вопросы вообще не изучались.

В настоящее время с внедрением ГИС-технологий и появлением оцифрованных (векторных) карт стало возможным решать подобного рода задачи. В рамках созданной ГИС «Бассейн Воткинского водохранилища» [7] по картам масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000 рассчитаны рассмотренные выше коэффициенты для рек, на которых организованы режимные наблюдения. Следует отметить, что построение зависимостей как среднегодового, так и максимального и минимального среднемесячного стока от коэффициентов расчлененности рельефа, предложенных Знаменщиковым [5, 6], не дало положительных результатов ни для горной, ни для равнинной частей рассматриваемой территории (коэффициенты корреляции менее 0,67). Не удалось выявить также зависимости стока рек горной части от среднего уклона бассейнов.

На наш взгляд, показателем расчлененности рельефа может выступать суммарная длина горизонталей в пределах бассейна. При этом на равнине число горизонталей невелико, а суммарная длина отражает горизонтальную расчлененность поверхности водосбора речной и овражно-балочной сетью. Чем больше развита речная сеть, что в свою очередь является показателем увлажненности территории, тем больше суммарная длина горизонталей. В горных районах, где с высотой увеличивается количество выпадающих осадков и, соответственно, сток рек, число горизонталей и их суммарная длина также возрастают, тем самым учитывается вертикальная расчлененность рельефа.

Но это возможно при условии, что высота сечения рельефа в пределах водосбора всей рассматриваемой территории постоянна. В то же время на топографических картах, в особенности мелких и средних масштабов (1 : 1 000 000 — 1 : 100 000), для отображения предгорных и горных районов высота сечения меняется. Так, например, для карты масштаба 1 : 1 000 000 сплошные горизонталы проведены через 50, 100 и 200 м соответственно для районов: ниже 300 м, от 300 до 1000 м и выше 1000 м над уровнем моря. Это не позволяет объективно оценивать расчлененность рельефа.

Применение геоинформационных технологий дало возможность на основе слоев векторных горизонталей и высот характерных точек рельефа рассчитать и построить дополнительные горизонталы с постоянной высотой сечения 50 и 20 м (соответственно для карт масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000) в пределах всего водосбора Воткинского водохранилища. После чего были вычислены суммарные длины горизонталей для исследуемых бассейнов рек [8]. Построенные зависимости среднегодулетних характерных расходов воды от этого параметра характеризуются коэффициентами корреляции $R = 0,95—0,99$. Примером выявленных закономерностей является зависимость нормы годового стока от суммарной длины горизонталей в пределах бассейна (рис. 1).

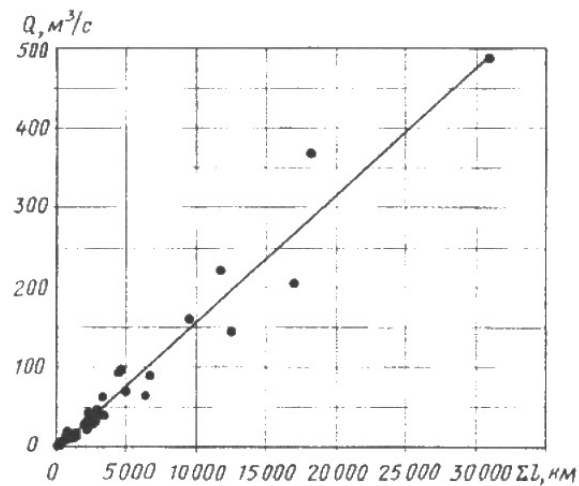


Рис. 1. Зависимость нормы среднегодовых расходов воды Q от суммарной длины горизонталей в пределах бассейна ΣL .

ки принимается отношение $\bar{S}/\bar{\sigma}$, т. е. отношение средней квадратической погрешности рассчитываемой величины к квадратическому отклонению предсказываемой величины. Чем меньше отношение, тем меньше погрешности расчетов.

Рассмотрим зависимости нормы годового стока (Q) в абсолютных значениях от площади водосбора (A), суммарной длины рек в пределах бассейна ($\Sigma l_{рек}$), суммарной длины горизонталей (Σl) и взаимосвязи последних (табл. 1а). Как видно из данных табл. 1, если рассматривать все реки без выделения горной и равнинной составляющих, то наиболее тесной является зависимость $Q = f(\Sigma l)$. Для равнинных рек существенно улучшается теснота связи $Q = f(A)$ и она практически не отличается от $Q = f(\Sigma l)$, однако наилучший результат получен по зависимости $Q = f(\Sigma l_{рек})$, что вполне объяснимо. Для горных рек, где существенную роль играет фактор рельефа, зависимость $Q = f(\Sigma l)$, отражающая влияние вертикальной расчлененности бассейнов, характеризуется наименьшими отклонениями точек от аппроксимирующей прямой.

Очень большие коэффициенты корреляции объясняются разным числом разных по водоносности рек, используемых для построения зависимости, подавляющее большинство которых относится к "средним" и "малым". Анализ результатов расчетов, выполненных отдельно для рек с нормой годового стока менее $100 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1б), показывает, что общая картина осталась прежней на фоне некоторого увеличения разброса точек. При этом зависимость $Q = f(\Sigma l)$ остается весьма показательной, в особенности для горных рек. Согласно критериям оценки, если отношение $\bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0,5$, то методика является хорошей (при соответствующей длине рядов).

При переходе к относительным величинам (модуль стока — $M = Q/A$) появляется возможность сравнивать сток разных рек, картографировать

При оценке стока неизученных рек в качестве интегрального показателя часто используют "условные" факторы, такие как площадь водосбора для равнинной территории и средняя высота водосбора для горной [3]. Поэтому имеет смысл провести сравнительный анализ зависимостей нормы годового стока от рассматриваемых показателей. С этой целью наряду с коэффициентами корреляции выполнен расчет отклонений эмпирических точек от линейных аппроксимаций для оценки погрешностей полученных результатов расчета. Согласно [1], за критерий применимости и качества методики

Таблица 1
Оценка зависимостей нормы годового стока рек водосбора Воткинского водохранилища от разных факторов

а) Все рассматриваемые реки						
Вид зависимости	Все реки ($m = 36$)		Равнинные ($m = 20$)		Горные ($m = 16$)	
	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$
$Q = f(A)$	0,922	0,383	0,986	0,160	0,949	0,301
$Q = f(\Sigma l_{рек})$	0,962	0,270	0,997	0,074	0,949	0,306
$\Sigma l = f(\Sigma l_{рек})$	0,938	0,343	0,992	0,144	0,981	0,188
$Q = f(\Sigma l)$	0,976	0,217	0,992	0,155	0,986	0,159
$M = f(\Sigma l/A)$	0,797	0,596	0,224	0,950	0,821	0,553

б) Реки с нормой годового стока менее $100 \text{ м}^3/\text{с}$						
Вид зависимости	Все реки ($m = 31$)		Равнинные ($m = 17$)		Горные ($m = 14$)	
	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$
$Q = f(A)$	0,761	0,638	0,978	0,204	0,749	0,639
$Q = f(\Sigma l_{рек})$	0,799	0,591	0,967	0,246	0,654	0,729
$\Sigma l = f(\Sigma l_{рек})$	0,911	0,406	0,981	0,188	0,845	0,516
$Q = f(\Sigma l)$	0,919	0,387	0,950	0,302	0,889	0,421
$M = f(\Sigma l/A)$	0,797	0,595	-0,064	0,958	0,818	0,554

Примечание. m — число водомерных постов, данные которых используются для построения зависимостей.

его характеристики и оценивать степень увлажненности территории, например по связи вида $M = f(H_{ср})$. Однако средняя высота водосбора это еще не "совокупность форм", это не рельеф. Одни и те же формы рельефа теоретически могут быть на разных высотах [9]. Поэтому $H_{ср}$ не является показателем расчлененности водосбора. Зависимость модуля стока от площади водосбора используется для определения критической величины водосборной площади, при ее превышении сток считается зональным. В нашем случае (площади водосборов рассматриваемых рек более 90 км^2) зависимость $M = f(A)$ является некорректной, поскольку это связь отношения Q/A с его собственным знаменателем [10] и она отсутствует. Как показывают исследования, суммарная длина горизонталей тесно связана с площадью водосбора как для равнинных, так и для горных рек. Модули стока для двух разных бассейнов могут быть одинаковыми, в то время как их площади и, соответственно, суммарные длины горизонталей будут существенно различаться, поэтому зависимости модуля стока от суммарной длины горизонталей также не наблюдается. Более обоснованными являются зависимости $M = f(\Sigma l/A)$, которые удалось получить только для горных рек (табл. 1).

Таким образом, суммарная длина горизонталей в пределах водосбора может служить показателем расчлененности рельефа: горизонтальной для равнинных и вертикальной для горных рек.

Рассмотрим возможность разделения горизонтальной и вертикальной составляющих расчлененности рельефа при рассмотрении всех исследуемых рек. Для этого суммарную длину горизонталей (Σl) разделим на число

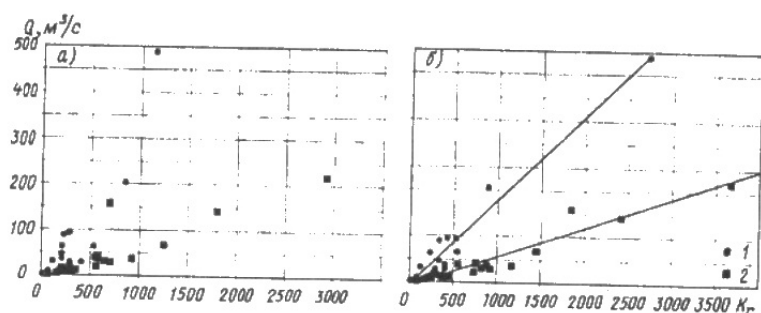


Рис. 2. Зависимость нормы среднегодовых расходов воды Q от коэффициента вертикальной расчлененности рельефа K_r , без учета (а) и с учетом (б) доли горной и равнинной составляющих в общей площади бассейна.

1 — горные реки; 2 — равнинные реки.

уровней расчленения рельефа (n) с постоянным шагом (через 50 м для карт масштаба 1 : 1 000 000), введя новый коэффициент рельефа

$$K_r = \frac{\sum l}{n}$$

Меньшие его значения при прочих равных условиях свидетельствуют о преобладании вертикальной расчлененности рельефа и наоборот.

На рис. 2а показана зависимость нормы годового стока от рассматриваемого коэффициента расчлененности рельефа. Точки горных рек располагаются ближе к оси ординат, что соответствует большим значениям расходов воды в реках, в бассейнах которых преобладает вертикальная расчлененность рельефа, поскольку увеличивается количество выпадающих осадков. Так, сравнение бассейнов рек равнинного и горного районов, примерно одинаковых по площади водосбора, показывает, что для бассейнов горных рек как $\sum l$, так и n больше, следовательно, K_r меньше (табл. 2). Таким образом, выявленная закономерность отражает особенности увлажнения территории.

В то же время, как видно на рис. 2, некоторые точки “типично равнинных рек” попадают в “горную зону”. Например, у р. Колва только верховья находятся в горной части, а на всем остальном протяжении это равнинная река. Поэтому необходимо вести расчет коэффициента расчлененности рельефа с учетом доли горной и равнинной составляющих в общей площади бассейна. Для территории водосбора Воткинского водохранилища к горным (в гипсометрическом отношении) можно отнести районы с высотами более 300 м над уровнем моря. В ГИС “ArcView” вычислены площади горной и равнинной частей исследуемых бассейнов. При этом коэффициент рельефа с учетом “горности бассейна” будет иметь вид

$$K_r = \frac{A_p}{A_{\text{общ}}} \frac{\sum l_p}{n_p} + \frac{A_r}{A_{\text{общ}}} \frac{\sum l_r}{n_r} \quad (4)$$

Таблица 2

Характеристики равнинных и горных бассейнов рек водосбора Воткинского водохранилища

Река — водомерный пост	Норма годового стока, m^3/c	Площадь водосбора, $км^2$	Суммарная длина горизонталей ($\sum l$), км	Число уровней расчленения (n)	$K_r = \sum l/n$
Коса — Коса	42,5	6340	2284,66	4	571,16
Язьва — Н. Язьва*	93,2	5840	4417,27	16	276,08
Иньва — Слудка	32,3	5210	2547,02	4	636,76
Яйва — Усть-Игум*	95,5	5230	4701,26	16	293,83
Обва — Рождественское	31,3	5540	2802,07	4	700,52
Косьва — Останино*	88,5	6220	6648,68	29	229,26

Примечание. Звездочкой отмечены бассейны горных рек.

где $A_{\text{общ}}$, A_p , A_r — соответственно общая площадь и площади равнинной и горной составляющих; $\sum l_p$, $\sum l_r$ — сумма длин горизонталей соответственно в пределах равнинной и горной частей бассейнов; n_p , n_r — число уровней расчленения рельефа в пределах равнинной и горной частей бассейнов. Таким образом, если бассейн расположен полностью в горной части, то первое слагаемое будет равно нулю, и наоборот. Как показывают расчеты, практически без изменения остались коэффициенты рельефа для “чисто” горных и “чисто” равнинных бассейнов рек и возросли для бассейнов с преобладанием равнинной составляющей. Полученные зависимости (рис. 2б) характеризуются более высокими коэффициентами корреляции ($R = 0,98$ для горных и равнинных рек) (табл. 3) по сравнению с зависимостями без учета долей равнинной и горной частей бассейнов (0,90 и 0,93 соответственно). Проведены расчеты отдельно для рек с нормой годового стока менее $100 m^3/c$ (табл. 3). Согласно критерию оценки $\bar{S}/\bar{\sigma}$, использование зависимости считается приемлемым, если обеспеченность допустимой погрешности расчетов не менее чем на 10% превышает обеспеченность вероятного

Таблица 3

Оценка зависимостей нормы годового стока рек водосбора Воткинского водохранилища от коэффициента расчлененности рельефа K_r

Вид зависимости	Равнинные реки ($m = 20$)		Горные реки ($m = 16$)	
	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$
Все исследуемые реки				
$Q = f(K_r)$	0,984	0,172	0,979	0,199
$M = f(K_r)$	0,124	0,970	0,179	0,953
Реки с нормой годового стока менее $100 m^3/c$				
$Q = f(K_r)$	0,933	0,657	0,757	0,630
$M = f(K_r)$	-0,283	0,918	0,033	0,963

отклонения предсказываемой величины от среднего. Это означает, что S/σ должно быть $\leq 0,75$ при числе членов ряда (m) от 15 до 25 (табл. 3). Зависимости вида $M = f(K_r)$ отсутствуют по той же причине, что и зависимости модуля стока от суммарной длины горизонталей (см. выше).

Аналогичные исследования с расчетом суммарной длины горизонталей в пределах бассейнов по картам масштаба 1 : 200 000 подтвердили выявленные закономерности влияния расчлененности рельефа на процессы формирования речного стока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-07-90225).

Литература

1. Бешани Н. Ф., Калинин Г. П. Уражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. — Л., Гидрометеиздат, 1983, 390 с.
2. Великанов М. А. Гидрология суши. — Л., Гидрометеиздат, 1948.
3. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты. — Л., Гидрометеиздат, 1990, 365 с.
4. Давыдов Л. К. Водоносность рек СССР, ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. — Л., Гидрометеиздат, 1947.
5. Знаменщиков Г. И. Исследование некоторых вопросов картометрии методами моделирования. /Автореферат дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. — М., МИИГАиК, 1965, 33 с.
6. Знаменщиков Г. И., Комлев А. М., Вержнев Р. Ф. Опыт исследования корреляционных связей между минимальным стоком рек и расчлененностью рельефа их водосборов. /В сб.: Гидрометеорология Сибири. Труды Новосибирского регионального гидрометцентра, 1969, вып. 3, с. 159—164.
7. Калинин В. Г., Пьянков С. В. Гидрологическая геоинформационная система бассейна Воткинского водохранилища. — Метеорология и гидрология, 2002, № 5, с. 95—100.
8. Калинин В. Г., Пьянков С. В. Использование гидрографических характеристик рек и их бассейнов в гидрологических расчетах. — Метеорология и гидрология, 2002, № 11, с. 75—80.
9. Комлев А. М. Закономерности формирования речного стока. Учебное пособие. — Пермь, Изд-во Пермского ун-та, 1992, 119 с.
10. Комлев А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. — Пермь, Изд-во Пермского ун-та, 2002, 163 с.
11. Норватов А. М. Минимальный сток малых рек в связи с подземным питанием. — Труды ГГИ, 1950, вып. 27 (81).
12. Попов Е. Г. Поверхность речного бассейна и ее роль в формировании стока. /В сб.: Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. II. — Л., Гидрометеиздат, 1959.

Поступила
12 V 2003

INFLUENCE OF THE RELIEF ON THE RIVER RUNOFF OF VOTKINSK RESERVOIR BASIN

V. G. Kalinin and S. V. P'yankov

Effects of the watershed surface features on river runoff are analyzed. Based on numerical models of the watershed relief, regularities of the runoff formation are determined depending on the coefficients of horizontal and vertical relief dissection proposed by the authors.

О загрязнении природной среды и радиационной обстановке на территории Российской Федерации в декабре 2003 г.*

А. М. Ованесянц, Т. А. Красильникова, Б. С. Летников

Загрязнение природной среды в результате аварий

Атмосферный воздух. В декабре 2003 г. сведений об авариях, вызвавших загрязнение атмосферы в населенных пунктах, не поступало. Стационарной сетью наблюдений повышенных уровней загрязнения воздуха, обусловленных аварийными ситуациями, не зарегистрировано.

Водные объекты. 9 декабря в районе п. Яя (Кемеровская область), в 10 км выше водозабора на р. Яя, произошел порыв нефтепровода Омск — Иркутск. На береговую полосу р. Яя вылилось более 5 т нефти, часть нефти попала в реку. Концентрация нефтепродуктов 9 декабря в воде р. Яя в 25 км ниже места аварии достигали 150 ПДК, что соответствует критерию экстремально высокого загрязнения. Проведена обработка загрязненной территории сорбентами.

Экстремально высокое загрязнение природной среды

Атмосферный воздух. В декабре 2003 г. случаев экстремально высокого загрязнения воздуха не зарегистрировано (в декабре 2002 г. — также не зарегистрировано).

Водные объекты. В декабре 2003 г. на территории Российской Федерации экстремально высокое загрязнение поверхностных вод веществами 1-го и 2-го классов опасности зарегистрировано 2 раза на 2 водных объектах (в декабре 2002 г. — 4 раза на 3 водных объектах).

16 декабря в районе п. Нагорный (Самарская область) при выполнении земляных работ экскаватором был задет штуцер не-санкционированной врезки на нефтепроводе "Дружба". Произошел разлив нефти на площади около 200 м². Авария устранена. Загрязненный грунт вывезен для утилизации.

16 декабря произошла авария (второй раз за четвертый квартал 2003 г., первый случай — 20 октября) на канализационном коллекторе МП "Пермьводоканал". Неочищенные стоки попали в р. Ива и далее в р. Кама (Воткинское водохранилище). Организовать учащенный отбор проб на участке аварии Воткинского водохранилища не представилось возможным из-за отсутствия устойчивого ледостава.

Экстремально высокое загрязнение поверхностных вод веществами 3-го и 4-го классов опасности зарегистрировано 29 раз на 12 водных объектах (в декабре 2002 г. — 29 раз на 18 водных объектах). Всего экстремально высокое загрязнение поверхностных вод зарегистрировано 31 раз на 14 водных объектах (табл. 1).

Основные источники загрязнения — предприятия металлургической, нефтяной, целлюлозно-бумажной промышленности и жилищно-коммунального хозяйства.

Высокое загрязнение природной среды

Атмосферный воздух. Случаи высоко-го загрязнения (ВЗ) атмосферы веществами 2-го класса опасности зарегистрированы:

диоксидом азота — во Владикавказе (1 случай, 10,4 ПДК), в Красноярске (2 случая, до 16 ПДК) и в Якутске (1 случай, 16 ПДК);

* Официальная информация Росгидромета.