

ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РЕК ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-05-00625а).

Работа посвящена построению гидроморфологических зависимостей на основании материалов, собранных по рекам разной величины, протекающим в Томской области. В работе рассмотрены предпосылки создания и значимость подобных уравнений. В качестве материалов для создания зависимостей искомого типа были использованы результаты компьютерного моделирования гидравлики речных потоков в среде HEC-RAS 3.2. Параметры гидроморфологических зависимостей оценены, исходя из общей линейной модели регрессии. В результате получены формулы зависимостей и коэффициенты детерминации, подтверждающие достоверность связей и точность их аппроксимации.

Ключевые слова: русло реки; деформации русла; гидравлика русловых потоков; гидроморфологические зависимости.

В период, когда остро стоит вопрос о глобальных изменениях, активном антропогенном вмешательстве на речных водосборах и непосредственно в руслах, возникает необходимость заблаговременного получения сведений о возможном влиянии подобных изменений на водотоки и их русла. Одним из самых распространенных инструментов, используемых для мониторинга состояния, создания проектов восстановления, исследования динамики и прогнозирования поведения водотоков, в настоящее время являются гидроморфологические зависимости, отражающие связь гидравлических и морфологических показателей в фиксированных поперечных сечениях и на целых участках русел. Наличие подобных зависимостей дает возможность предсказать будущее состояние рек и, в частности, характеристики их русла. При этом зависимости такого вида дают возможность как качественного, так и количественного представления реакции водотоков на воздействия разного характера [1].

Для прогнозирования непосредственно морфологических изменений русла значительный интерес представляют зависимости, отражающие влияние на русло так называемых характерных расходов воды (прежде всего руслоформирующих, а также руслонаполняющего или среднего многолетнего). При прохождении этих расходов отмечается сложное и наиболее существенное взаимодействие потока и русла. При построении гидроморфологических зависимостей наибольшее распространение получили такие характеристики, как: $Q_{\text{рн}}$ – руслонаполняющий (или руслоформирующий, доминирующий, эффективный) расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; B – ширина русла, соответствующая принятому характерному расходу воды, м ; H – средняя глубина потока, м ; V – средняя скорость в поперечном сечении русла, $\text{м}/\text{с}$; I – уклон водной поверхности, $\text{м}/\text{м}$. Кроме того, при построении гидроморфологических зависимостей в качестве аргумента применяется и средний диаметр частиц донных отложений, d_{50} , м . Некоторые уравнения включают также интенсивность транспорта наносов или параметр Шильдса τ^* , определяемый по формуле $\tau^* = HI/[(G-1)gd_{50}]$, где G – удельный вес частицы; g – ускорение свободного падения. Зависимости такого типа получили наибольшее распространение в зарубежной литературе и до этого при исследовании рек данного региона не применялись [2, 3].

Несмотря на то что попытки установления связи рассматриваемых характеристик руслового потока предпринимались с конца XIX столетия, действительно

значимые и обоснованные достижения были получены лишь в середине XX в. в работах С.И. Рыбкина [4], Л. Леопольда и Т. Маддока [5] и др.

Гидроморфологические зависимости искомого вида можно получить с помощью регрессионного анализа большого объема данных о ширине, средней глубине и скорости, уклоне, размере частиц донных отложений и параметре Шильдса, соответствующих характерному расходу воды. Зависимости, полученные для конкретного сечения, характеризуют соотношение гидравлических и морфологических характеристик потока как непосредственно в данном сечении, так и ниже его на протяжении распространения гидравлически однородного состояния потока [6].

В 1995 г. опубликована работа [2], посвященная геометрии аллювиальных русел, в которой, исходя из фундаментальных уравнений водного стока, гидравлического сопротивления, движения донных наносов и вторичных течений на излучинах, получены полумпирические уравнения для определения ширины русла, средней глубины и скорости потока, уклона и параметра Шильдса. Они записываются как степенные функции от трех независимых переменных: характерного расхода, среднего диаметра донных отложений и уклона, либо параметра Шильдса [3].

Для получения параметров этих зависимостей использовались данные по 1 125 измерениям. Диапазоны значений исследуемых характеристик представлены в табл. 1. Позднее J.-S. Lee, P. Julien [3] провели расчеты по данным, полученным в измерениях еще по 360 сечениям (309 из этих измерений выполнены в поле, а 51 – в лаборатории), и получили новые значения параметров уравнений (табл. 2).

Целью данного исследования является установление зависимостей подобного вида для рек различной величины, протекающих в пределах Томской области. Для этого были решены следующие задачи:

- 1) выявлены закономерности формирования русел рассматриваемых рек;
- 2) путем компьютерного моделирования собран необходимый объем данных для получения искомого зависимостей;
- 3) в рамках общей линейной модели регрессии для логарифмически преобразованных величин получены параметры зависимостей искомого вида.

Авторами настоящей работы собраны данные по 633 сечениям на разных участках 5 равнинных рек разной величины, протекающих в Томской области

(табл. 2). Названия рек, используемых в исследовании, и протяженность участков представлены в табл. 3. Эти реки равнинные, они протекают в хорошо выраженных долинах с поймой и террасами, в их руслах имеются выходы коренных пород, что отличает их от типично аллювиальных рек (каковой является, например, р. Обь на исследуемых участках). В русле и по берегам р. Томь также встречаются выходы коренных пород, а

русло сложено гравийно-галечными отложениями, принесенными из горной части бассейна. В гранулометрическом составе остальных рек преобладают песчаные фракции. Русла рек, как правило, извилистые, иногда встречаются разветвления на два (Обь) или более (Томь) рукава. Во всех случаях присутствует пойма. Диапазоны значений параметров представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Диапазоны значений используемых параметров

Параметр	J–W* (1 125) [3]	L–J* [3]		З–К*
		Полевые (309)	Лабораторные (51)	
B , м	1,44–1 097	2,32–610	0,22–2,44	11,56–1 734
H , м	0,04–16	0,10–13	0,005–0,244	0,38–17,2
V , м/с	0,02–7,1	0,04–4,26	0,11–0,86	0,12–4,82
$Q_{\text{рн}}$, м ³ /с	0,048–26 560	0,137–11,546	0,0002–0,227	9–20 000
I , м/м	0,00001–0,081	0,000044–0,0508	0,00023–0,017	0,000001–0,0071
d_{50} , м	0,00001–0,945	0,00002–0,343	0,000011–0,0023	0,0008–0,0187
τ^*	0,00092–35,5	0,00093–12,7	0,1337–5,89	0,000814–0,1521

Примечание. Здесь и далее L–J – Lee–Julien, J–W – Julien–Wargadalam, З–К – Земцов–Киселёв.

Т а б л и ц а 2

Сопоставление гидроморфологических зависимостей

Параметр	Автор	Уравнение	R^2
B , м	L–J	$B = 3,004Q^{0,426}d_{50}^{-0,002}I^{-0,041}$	0,87/0,87
	J–W	$B = 1,33Q^{0,44}d_{50}^{-0,11}I^{-0,22}$	0,77/0,85
	З–К	$B = 8,87Q^{0,363}d_{50}^{0,228}I^{-0,247}$	0,88
H , м	L–J	$H = 0,201Q^{0,336}d_{50}^{-0,025}I^{-0,060}$	0,93/0,89
	J–W	$H = 0,2Q^{0,33}d_{50}^{0,17}I^{-0,17}$	0,81/0,88
	З–К	$H = 6,46Q^{0,276}d_{50}^{-0,041}I^{-0,121}$	0,91
V , м/с	L–J	$V = 2,996Q^{0,198}d_{50}^{0,007}I^{0,242}$	0,89/0,72
	J–W	$V = 3,76Q^{0,22}d_{50}^{-0,05}I^{0,39}$	0,87/0,55
	З–К	$V = 2,28Q^{0,265}d_{50}^{-0,144}I^{0,376}$	0,70
I , м/м	L–J	$I = 4,981Q^{-0,346}d_{50}^{0,955}\tau^{*0,966}$	0,93/0,96
	J–W	$I = 12,4Q^{-0,4}d_{50}\tau^{*1,2}$	0,86/0,94
	З–К	$I = 144,5Q^{-0,329}d_{50}^{1,19}\tau^{*1,04}$	0,97
τ^*	L–J	$\tau^* = 0,090Q^{0,423}d_{50}^{-0,965}I^{0,912}$	0,96/0,81
	J–W	$\tau^* = 0,121Q^{0,33}d_{50}^{-0,83}I^{0,83}$	0,93/0,86
	З–К	$\tau^* = 102,3Q^{0,276}d_{50}^{-1,04}I^{0,879}$	0,93

Примечание. В числителе приводятся значения R^2 , вычисленные по данным, положенным в основу при получении соответствующих зависимостей их авторами, в знаменателе – по данным для рек Томской области.

Т а б л и ц а 3

Информация об участках рек, используемых в исследовании

Объект	Количество участков	Количество сечений	Протяженность, км
р. Итатка	5	107	4,30
р. Куендат	5	95	3,73
р. Ушайка	4	127	3,29
пр. Суровская (р.Томь)	3	64	9,00
р. Томь (от с. Ярского до с. Казанка)	5	121	22,1
р. Обь (месторождение Чангара)	3	119	23,0

Рассмотрим методы получения исходных данных. Руслонаполняющие расходы воды на участках и значения характеристик русла и потока получены по результатам моделирования соответствующих фрагментов русловой системы в программе HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) версии 3.2 [7]. Все используемые значения соответствуют руслонаполняющему расходу воды ($Q_{бр}$). Методика определения $Q_{бр}$ и соответствующих ему гидравлических и морфометрических характеристик в подобном HEC-RAS пакете программ MIKE предложена в работе [8], посвященной определению величины и повторяемости руслонаполняющих расходов воды на примере 16 рек Франции. Значения $Q_{бр}$ по данной методике определяются для участков протяженностью 15–20 ширин русла в бровках. Подобное ограничение протяженности участков весьма справедливо, так как русла естественных

рек отличаются довольно значительным изменением морфологических параметров даже в пределах весьма короткого участка.

Руслонаполняющим расходом воды на ограниченном таким образом участке является значение расхода, которое соответствует заполнению русла в уровень бровок в максимальном числе сечений, относящихся к данному участку. Использование данного подхода позволяет наиболее объективно оценить значение $Q_{бр}$, избегая при этом значительного колебания его величины. Положение бровок русла определяется для каждого расчетного сечения. При этом предполагается, что руслонаполняющий расход для сечения проходит при уровне бровки, имеющей меньшую отметку, т.е. при данной отметке происходит выход воды на пойму. На рис. 1 представлена схема для определения положения бровок русла.



Рис. 1. Схема для определения положения бровок русла на участках с разным типом руслового процесса [7]

Программа HEC-RAS, используемая нами, реализует одномерный подход к моделированию и включает блок расчета установившегося плавно изменяющегося движения воды. При заданных расходах воды в русле рассчитываются продольные профили водной поверхности (кривые свободной поверхности – КСП). Система может работать с полной русловой сетью, древообразной речной системой или отдельным участком русла. Она может в одномерном варианте моделировать профили водной поверхности для спокойного, бурного и смешанного состояний потока [7].

Профили водной поверхности вычисляются от одного поперечного сечения к другому с помощью стандартной пошаговой процедуры путем решения одномерного уравнения энергии (уравнения Бернулли), записываемого для двух смежных сечений потока:

$$WS_1 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} = WS_2 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} + h_t, \quad (1)$$

где WS_1 , WS_2 – потенциальные напоры (отметки водной поверхности) в сечениях 1 и 2, м; V_1 , V_2 – средние скорости в этих сечениях, м/с; α_1 , α_2 – коррективы скорости; g – ускорение свободного падения, м/с²; h_t – потери энергии, м. Все слагаемые уравнения выражены в единицах напора, м.

Общие потери энергии между двумя поперечными сечениями складываются из потерь на преодоление сил трения и потерь на внезапное расширение или сжатие потока:

$$h_t = L \cdot \bar{S}_f + c \left(\frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right), \quad (2)$$

где L – средневзвешенная (по расходу воды) длина потока на участке, км; $\bar{S}_f$ – уклон трения; c – коэффициент сопротивления на расширение или сжатие потока [7].

Неизвестный профиль водной поверхности в заданном поперечном сечении определяется решением уравнений (1) и (2) методом последовательных приближений. Расчет при спокойном течении потока ведется снизу вверх по течению, при бурном – в обратном направлении [7].

Для расчета КСП в модели HEC-RAS необходимо задать геометрию потока: поперечные сечения, включающие русло и пойму, расстояния между сечениями и параметры потерь на сопротивление. Геометрия задавалась по: 1) картам (планам) русла и поймы; 2) данным о размерах и форме поперечных сечений потоков; 3) длин участков между сечениями по тальвегу, правого и левого берега русла. Гидрологические данные включают расходы и уровни воды во входном и выходном створах участка.

При калибровке модели должно быть обеспечено согласование рассчитанного и наблюдаемого положения КСП в русле на рассматриваемом участке при заданных (измеренных) расходах воды в характерных сечениях и известной отметке свободной поверхности в замыкающем створе участка. Отметки водной поверхности вычисляются при спокойном состоянии потока

(число Фруда $Fr < 1$) снизу вверх по течению, т.е. профиль водной поверхности «опирается» на одну нижнюю точку. Приемлемое соответствие рассчитанных отметок уровня воды, измеренным в фиксированных створах, где производятся наблюдения за уровнями воды, достигается подбором значений коэффициентов потерь (Маннинга, потерь на сжатие и расширение русла) для разных поперечных сечений потока [9]. Достоверность параметров также подтверждается результатами измерения скоростей и других гидравлических характеристик в разных сечениях.

Измеренные во входном створе участка отметки водной поверхности при разных фактических расходах воды во входном створе сравниваются с рассчитанными по модели HEC-RAS отметками. Каждое измерение расхода воды сопровождается измерением уклона свободной поверхности путем определения отметок горизонта воды в характерных сечениях, данные о которых используются при калибровке модели. Производится также отбор проб донных отложений для определения их среднего диаметра на участке.

При задании геометрических данных для каждого из поперечных сечений, входящих в модель, определяются положение бровок русла, их высотные отметки и ширина русла. Далее исходный участок делится на несколько более коротких участков (протяженностью 15–20 ширин русла в бровках) и путем последовательного подбора значений расхода воды для каждого из подучастков определяется расход воды, проходящий при отметках, соответствующих отметкам бровок. Русло-наполняющим расходом воды для каждого подучастка принимается тот расход воды, который соответствует наполнению наибольшего количества сечений на участке. Для этого значения расхода и определяются все необходимые характеристики по каждому из сечений.

Диапазоны значений используемых авторами параметров также представлены в табл. 1. По этим данным авторами получены собственные гидроморфологические зависимости, показанные в табл. 2.

Кроме того, в табл. 3 представлены коэффициенты детерминации R^2 , характеризующие точность полученной регрессионной модели, для всех рассматриваемых в работе уравнений. Значения R^2 практически для всех уравнений, кроме уравнения для ширины, превышают

0,8, что свидетельствует о достаточно точной аппроксимации.

Результаты расчетов представлены и в графическом виде (рис. 2–6), где показаны результаты применения рассматриваемых формул при подстановке в них данных по рекам Томской области, перечисленных в табл. 3. На графиках представлены совмещенные результаты расчетов по всем трем имеющимся для каждой характеристики уравнениям (табл. 2). Очевидны весьма близкое совпадение рассчитанных величин по уравнениям, предложенным авторами и Lee–Julien, и более существенное отклонение по уравнениям Julien–Wargadalam для ширины, глубины и скорости потока (рис. 2–4).

Следует отметить существенный разброс точек на графике для скорости потока, который может быть объяснен своеобразностью распределения скоростного поля на р. Итатка. Полученные при расчете значения скорости здесь существенно превышают фактические, что объясняется большой степенью запруженности русла поваленными деревьями и бобровыми плотинами. Это приводит к подпорным явлениям, в результате чего наблюдается существенный перепад отметок поверхности воды, а следовательно, и скоростей течения на очень коротких расстояниях непосредственно ниже завала, тогда как зона выклинивания подпора вверх по течению распространяется на значительное расстояние, приводя к заметному снижению фактических скоростей на значительном протяжении реки.

Что касается графиков для уклонов русла и параметра Шильдса, то на них наблюдается существенное расхождение полей точек, рассчитанных по уравнениям, полученным авторами, и по зависимостям Lee–Julien и Julien–Wargadalam. На графике уклонов (рис. 5) результаты зарубежных исследователей лежат ниже авторских, а на графике параметра Шильдса (рис. 6) – выше.

В заключение следует отметить, что точность аппроксимации и, соответственно, определения параметров потока и русла, полученные авторами, практически такие же, как и у формул, полученных для других рек мира, что следует из значений коэффициента детерминации.

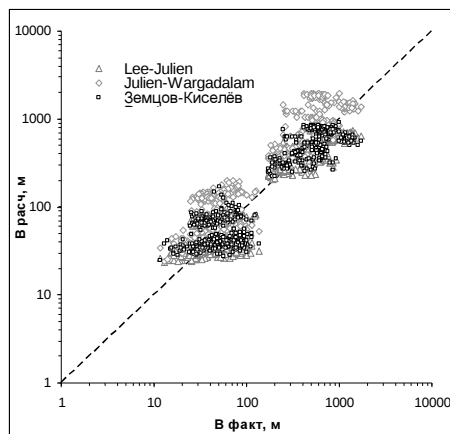


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетов ширины русла с фактическими данными

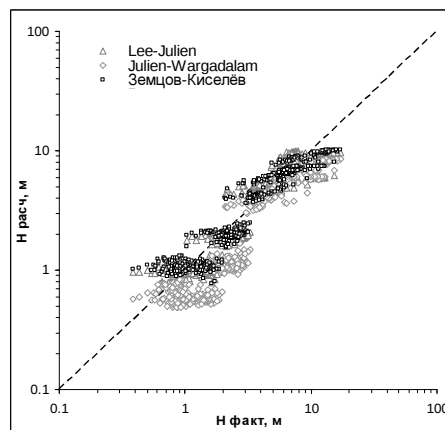


Рис. 3. Сопоставление результатов расчетов глубины русла с фактическими данными

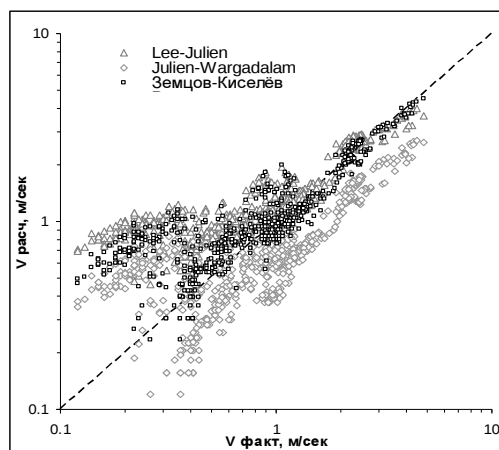


Рис. 4. Сопоставление результатов расчетов средней скорости потока с фактическими данными

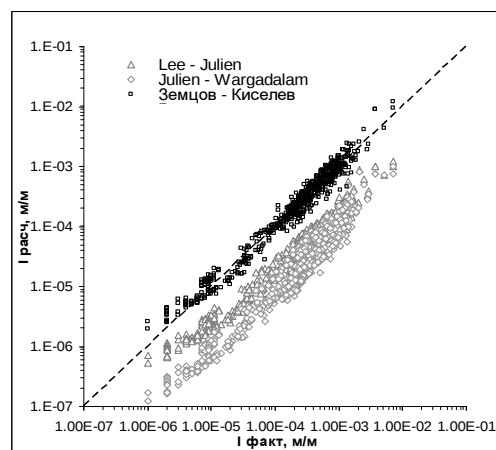


Рис. 5. Сопоставление результатов расчетов уклонов русла с фактическими данными

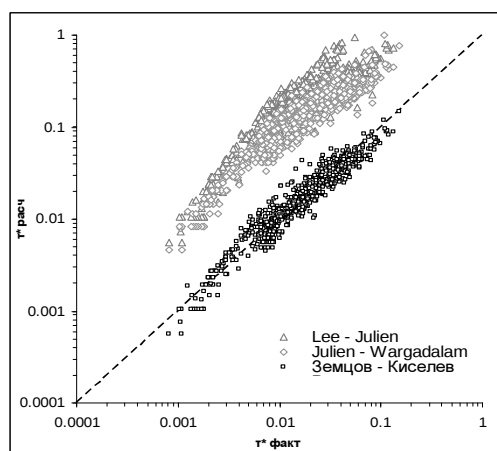


Рис. 6. Сопоставление результатов расчетов параметра Шильдса с фактическими данными

Формулы, полученные авторами, дают более высокую точность расчета для рек Томской области таких характеристик, как уклон и параметр Шильдса. Рассмотренные формулы других авторов дают систематические погрешности вычисления этих величин. Возможными причинами такого смещения являются заломы, засоренность русла и т.п., присущие малым рекам рассматриваемого региона и неучтенные другими авторами.

Возможно, имеет значение и то обстоятельство, что в руслах исследуемых нами рек, помимо аллювиальных отложений, местами имеются выходы корен-

ных пород. Этот вопрос требует специального исследования. Кроме того, при низких скоростях течения велики погрешности расчета скорости течения на наших реках (в основном систематические) при использовании любой из рассмотренных формул.

Полученные формулы можно применять для рр. Обь, Томь и малых рек юга Томской области при решении задач проектирования разного рода гидротехнических сооружений, расчистки русел рек и мероприятиях, связанных с управлением изменениями речного стока. Они дают возможность предсказать характеристики речного русла при изменении водности реки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антроповский В.И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие // Труды ГТИ. 1969. Вып. 169. С. 34–86.
2. Julien P.Y., Wargadalam J. Alluvial channel geometry: Theory and applications // Hydraul. Eng. 1995. № 121(4). P. 312–325.
3. Jong-Seok Lee, Pierre Y. Julien. Downstream Hydraulic Geometry of Alluvial Channels // Journal of hydraulic engineering. 2006. P. 1347–1352.
4. Рыбкин С.И. Морфометрическая классификация рек // Метеорология и гидрология. 1947. № 4. С. 46–52.
5. Leopold L.B., Maddock T.J. Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications // U.S. Geological Survey Professional Paper. 1953. № 252. P. 55.
6. Vijay P. Singh. On the theories of hydraulic geometry // International journal of sediment research. 2003. Vol. 18, № 3. P. 196–218.
7. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), HEC-RAS. User's Manual. Davis, CA, 1995.
8. Navratil O., Albert M.-B., Hérouin E., Gresillon J.-M. Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches // Earth Surface Processes and Landforms. 2006. P. 1345–1363.
9. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Крутовский А.О. и др. Русловые и пойменные процессы рек Сибири. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2007.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 15 февраля 2011 г.