

Методика научных исследований

УДК 551.4.012:551.435.134→551.4.07

© 2017 г. А.Ю. СИДОРЧУК¹, А.В. ПАНИН^{1, 2}**ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ
РЕЧНОГО СТОКА В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ
(ст. 2. Гидравлические методы реконструкции расходов палеорек)**

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия
e-mail: fluvial05@gmail.com, a.v.panin@yandex.rul

Для оценки гидравлических и гидрологических характеристик древних русел применимы методы гидравлики открытых русел, разработанные для расчетов пропускной способности русел каналов и рек. Большой накопленный эмпирический материал позволяет проводить расчеты пропускной способности русел с точностью 10–15%. Такая же точность доступна для оценки руслонаполняющего расхода в палеорусле при правильном выборе расчетного живого сечения и реконструкции его морфометрии: отметок бровки поймы, ширины палеорусла на этих отметках, средней глубины и уклона.

Характеристики морфометрии древних русел и гранулометрического состава руслового аллювия получаются при детальном бурении по поперечникам. В современных руслах для расчетов расходов воды по формуле Шези выбираются прямолинейные участки без подпора, растекания или схождения струй потока. В меандрирующих палеоруслах таким условиям соответствуют середины прямолинейных вставок между двумя соседними излучинами русла. Это перекатные участки русла, здесь в минимальной степени проявляется продольная и поперечная неравномерности потока, при высоких уровнях невелики подпорные явления. В таком створе наиболее целесообразно закладывать поперечный буровой профиль для получения формы живого сечения палеорусла.

Наиболее достоверные результаты получаются для недеформируемых (слабо деформируемых) палеорусел. Для деформируемых палеорусел неопределенность в оценке древних расходов воды существенно увеличивается. Изменение формы живого сечения палеорусла в процессе его захоронения, неясность в определении литологических контактов руслового аллювия и толщи заполнения, неточности в определении уклона палеорусла, приводят к увеличению ошибки этой оценки.

Переход от руслонаполняющего расхода к расходам воды иной обеспеченности, среднему или среднемаксимальному, осуществляется уже по эмпирическим связям. Это существенно снижает точность расчетов, так как ошибки эмпирических зависимостей неясны и их сложно уменьшить. Поэтому точность гидравлического и морфометрического методов при оценке среднего расхода воды примерно одинакова и составляет 30–40%.

Ключевые слова: позднеледниковье, голоцен, палеорусла, гидравлические методы, пропускная способность, реконструкция стока воды.

Введение

На поверхности пойм и низких террас рек хорошо прослеживаются следы древних русел в виде староречий. Они обычно в той или иной степени заполнены разнообразными отложениями. Ширина этих древних русел и другие характеристики морфометрии

русел в плане измеряются на картах и иных изображениях речных долин. На основании этих измерений при применении метода морфометрических зависимостей [1] оцениваются величины расходов воды, которые проходили по этим руслам. Сведения о глубинах древних русел и гранулометрическом составе руслового аллювия можно получить только детальным бурением по поперечникам. Тогда для оценки гидравлических и гидрологических характеристик древних русел применимы методы гидравлики открытых русел, разработанные для расчетов пропускной способности русел каналов и рек (см., например, [2]). Этот подход впервые был использован Г. Дьюри [3] для палеогидрологических построений. Хотя Дьюри отдавал предпочтение методу морфометрических зависимостей, неоправданно большие полученные им величины стока воды в древних реках создали атмосферу недоверия вокруг этого метода. В результате в последнее время многие исследователи палеорусел используют для оценки стока воды методы гидравлики открытых русел [4, 5]. Рассмотрим главные особенности применения этих методов для восстановления стока древних рек, их достоинства и недостатки.

Оценка пропускной способности речного русла

Пропускная способность русла для установившегося потока рассчитывается по формуле

$$Q = UWD. \quad (1)$$

Здесь Q – расход воды при заданном уровне воды, W – ширина русла и D – его средняя глубина при этом уровне, U – средняя скорость потока. Будем исходить из того, что при геоморфологических исследованиях и бурении по поперечникам ширина и глубина палеорусел измеряются. Тогда гидравлическая задача сводится к оценке скорости потока U .

Эмпирическая формула для определения скорости течения воды при равномерном течении при наличии информации о геометрии живого сечения водотока, его уклоне и шероховатости была получена во второй половине XVIII в. Антуаном Шези (1775) и Пьером Дюбуа (1779) [см. 6]. В современном виде это уравнение Шези:

$$U = C\sqrt{DS}. \quad (2)$$

Здесь S – уклон свободной поверхности, который для палеорусел также должен быть измерен. Шероховатость русла характеризуется эмпирическим коэффициентом C . Его непостоянство для разных водотоков открыло специальную область гидравлики – подбор максимально универсальной эмпирической формулы для его расчета. Около 20 таких формул приведено в [2], из которых наиболее популярна формула Маннинга:

$$C = \frac{D^{1/6}}{n}. \quad (3)$$

Во все формулы этого класса входят глубина русла и коэффициент шероховатости n .

Значение коэффициента шероховатости для разных типов дна русла потока, начиная с работы Гангилье и Куттера [7], представляют в виде таблиц. Наиболее распространены таблицы М.Ф. Срибного [8] и Чоу [9]. В этих таблицах дается качественное описание состояния русла и значение n . Например, для естественных русел в весьма благоприятных условиях назначается $n = 0.025$ по Срибнову.

Коэффициент шероховатости n также оценивается по медианному диаметру частиц донных отложений d (в мм). Тогда коэффициент Шези рассчитывается, например, с помощью формулы А.В. Караушева [10]

$$C = 33\left(\frac{D}{d}\right)^{1/6}. \quad (4)$$

Формулы (3–4) являются эмпирическими, применять их можно только в пределах значений гидравлических характеристик потока, которые были использованы при их выводе (в том числе тех, которые в формулах присутствуют неявно, в виде эмпирических коэффициентов).

Для уменьшения влияния поперечной неравномерности глубин и шероховатости русла на полученном для расчета живом сечении расчет расхода воды по формуле Шези проводится принятым в гидрометрии способом по средним скоростям на отдельных вертикалях, затем частные расходы складываются. Расход воды, рассчитанный по осредненным по всему живому сечению величинам скоростей и глубин потока больше рассчитанного по отдельным вертикалям на 2–3% для трапециoidalного русла и на 3–5% для треугольного.

Относительная ошибка расчета расхода воды складывается из ошибок составляющих формулы (1) и равна (в случае использования формулы (3))

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta W}{W} = \ln n \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta S}{2S} + \frac{5\Delta D}{3D} + \frac{\Delta W}{W}. \quad (5)$$

Для каждого конкретного случая эта ошибка рассчитывается исходя из точности определения ширины, глубины, шероховатости русла и уклона.

Расчеты расходов палеорек

Расчеты с помощью формулы Шези (с использованием для оценки коэффициента C формул (3–4) или иного вида) проводятся для одного или нескольких живых сечений палеорусла. Поток предполагается установившимся и равномерным, второе условие служит определяющим в выборе расчетного сечения в палеорусле. В современных руслах для расчетов расходов воды по формуле Шези выбираются прямолинейные участки без подпора, растекания или схождения струй потока. В меандрирующих палеоруслах таким условиям соответствуют середины прямолинейных вставок между двумя соседними излучинами русла. Это перекатные участки русла, здесь в минимальной степени проявляется продольная и поперечная неравномерность потока, при высоких уровнях невелики подпорные явления. В таком створе наиболее целесообразно закладывать поперечный буровой профиль для получения формы поперечного сечения палеорусла.

Для оценки шероховатости палеорусла необходимо установить морфодинамический тип и характерные морфометрические параметры этого палеорусла, условия его формирования, по этим признакам найти современные реки-аналоги и по данным о шероховатости русел этих рек-аналогов выбрать подходящую формулу для расчета коэффициента в формуле Шези. В долинах рек с хорошо выраженными фрагментами палеорусел значительная часть современной поймы сформирована в период активности палеорусла. Поэтому для оценки уклона палеорусла обычно применяется уклон поверхности поймы вдоль палеорусла с учетом извилистости последнего.

Расчет расхода воды проводится для некоторого уровня воды в палеорусле. Этот уровень не должен быть низким, так как при низких уровнях воды в русле велика продольная неравномерность потока. Этот уровень нецелесообразно назначать выше бровок поймы, так как при затоплении поймы возникают сложности с оценкой ее шероховатости. Обычно расчеты проводятся для уровня руслонаполнения в бровках поймы, оценивается так называемый руслонаполняющий расход воды. Назначение уровня руслонаполнения на поперечном профиле разбуренного палеорусла иногда представляет собой сложную задачу.

По результатам наших исследований были определены основные морфометрические характеристики некоторых палеорусел (таблица). Для этих палеорек были подобраны современные аналоги: реки, которые по морфодинамическому типу соответствуют палеорекам и для этих рек-аналогов собраны все необходимые данные для подбора параметров формул для определения коэффициента Шези.

Морфогидравлические характеристики (при уровнях заполнения русла) исследованных палеорусел рек Русской равнины

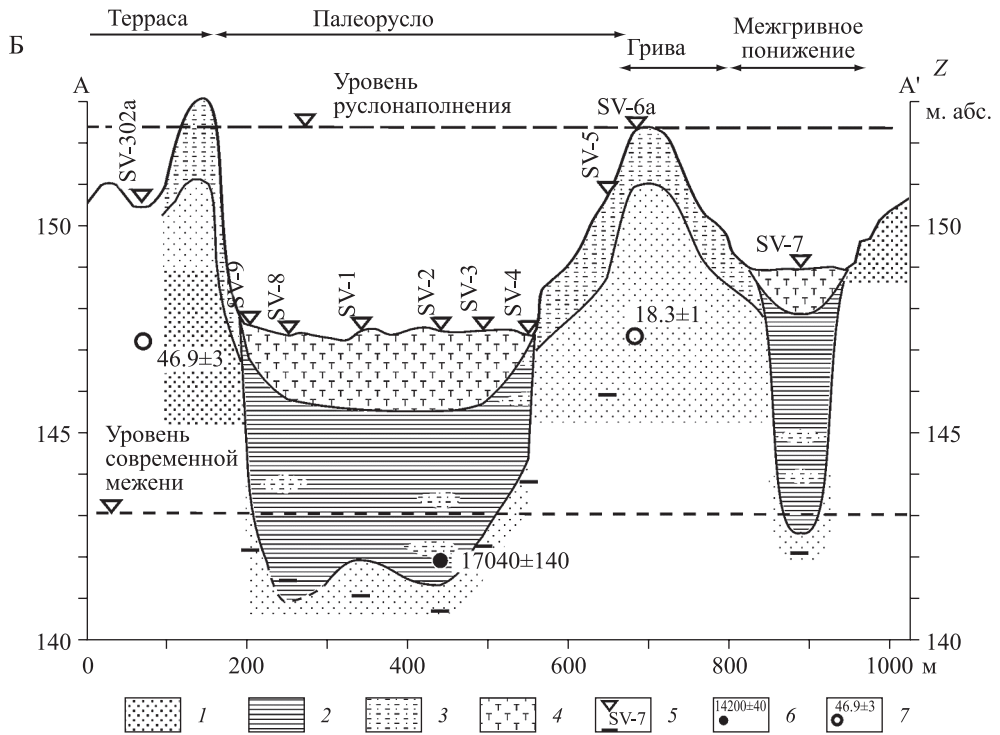
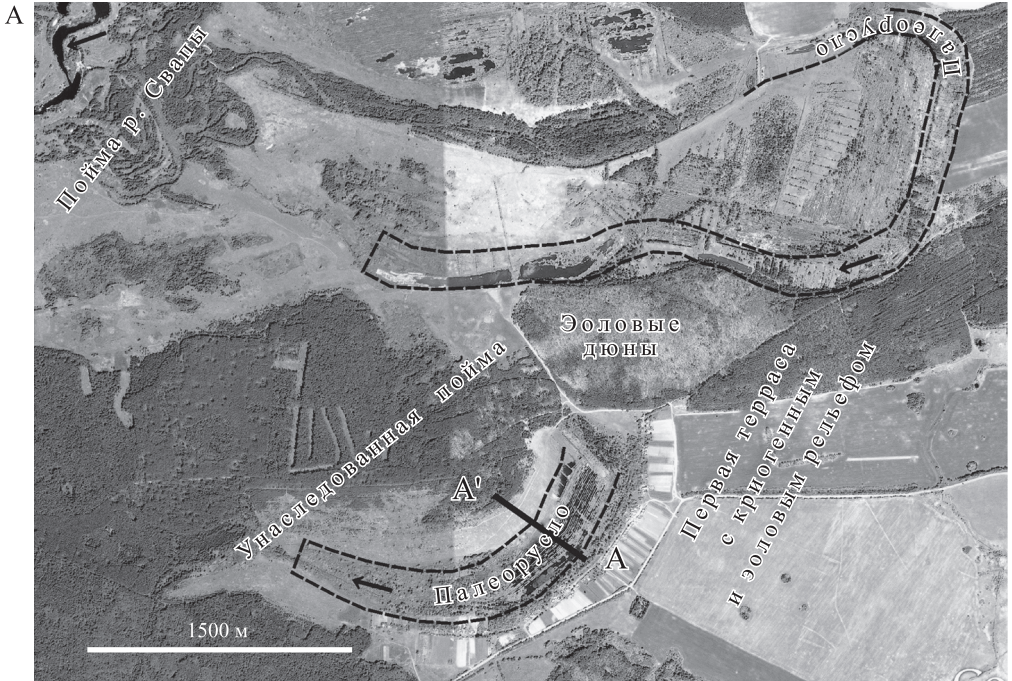
Местоположение определения морфометрических характеристик	Палеорусло р. Свипы у д. Семеновка	Палеорусло р. Хопер у с. Танширей	Староречье Белозерка (р. Хопер)	Палеорусло р. Москвы у с. Остров (на перекате)	Палеорусло р. Протвы у г. Боровска	Старица р. Вычегды у пос. Вычегодский
Точность определения морфометрических характеристик	высокая	низкая	высокая	средняя	высокая	средняя
Ширина на перекатах (м)	480	670	280	530	220	700
Средняя глубина (м)	8.7	4.8	4.6	5.5	6.2	5.9
Уклон по руслу	0.000065	0.000154	0.000092	0.000117	0.000323	0.000055
Средняя крупность донных грунтов (мм)	0.25	0.25	0.25	0.5	25	0.25
Шаг излучин русла (м)	1400	2500	1100	2180	800	4500
Рассчитанный палеорасход воды (м ³ /с) при уровне наполнения русла	6000	7100	1400	5400	1600	4150
Современный руслонаполняющий расход воды (м ³ /с) на участке долины с узкой поймой	450	670	670	~1000	~400	7000

Иногда морфология палеоруслу и уровень руслонаполнения устанавливаются с высокой степенью определенности. Например, палеоруслу реки Свапы у д. Семеновка [11] четко выражено в рельефе на протяжении нескольких десятков километров (рис. А). Бурением на прямолинейной вставке между изгибами макроизлучины вскрыт ящикообразный русловой врез с днищем на отметках 141–141.5 м, выстланный мелко- и среднезернистыми песками русловой фации (рис. Б). Врез заполнен старичными алевритистыми глинами с линзами заиленных песков. Накопление глин (т.е. отмирание палеоруслу) начинается не позднее 17.0 тыс. кал.л.н. (^{14}C дата 14030 ± 70 , Ki-6997)¹. Левый борт палеоруслу подрезает первую надпойменную террасу с отметками поверхности 151–153 м. Правый борт ограничен аккумулятивной гривой симметричной формы с узким гребнем. Ее вершина имеет отметки 152.5 м, т.е. доходит до уровня первой террасы. Очевидно, грива формировалась у вогнутого берега в ходе искривления макроизлучины. Близость ее отметок с отметками террасы свидетельствует, что современная первая терраса р. Свапы могла затопливаться в период формирования палеоруслу и в это время характеризовалась пойменным гидрологическим режимом, хотя как геоморфологическая поверхность она сформировалась значительно раньше: об этом свидетельствует средневалдайская оптико-люминесцентная (ОСЛ) дата около 47 тыс.л.н., полученная для ее руслового аллювия (рис. Б). Уровень руслонаполнения вполне уверенно проводится на отметке 152.5 м (несколько ниже бровки террасы на левом берегу палеоруслу и по вершине гривы на правом берегу). Ширина палеоруслу при этом уровне составляла 480 м, средняя глубина – 8.7 м (см. рис. 1 в приложении [12]). Современная пойма р. Свапы на этом участке в основном сформирована в результате горизонтальных переформирований в период активности палеоруслу (унаследованная пойма). Поэтому уклон палеоруслу 0.065 м/км оценивается по уклону современной поймы р. Свапы с поправкой на извилистость палеоруслу. Рассчитанный расход воды при коэффициенте в формуле (3) $n = 0.024$ составил $6000 \text{ м}^3/\text{с}$. Это более чем в 10 раз больше, чем руслонаполняющий расход воды современной р. Свапы.

Существенно более сложная интерпретация морфологии палеоруслу р. Сейм у дер. Кудинцево. На участке реки выше устья р. Свапы отчетливо видны фрагменты омеговидных макроизлучин со средним шагом 3 км и шириной 750–800 м. Разбурен поперечный профиль в области смены знака кривизны палеоруслу (см. рис. 2 в приложении [12]). Русловой врез имеет асимметричную треугольную форму. Тальвег смещен к коренному борту (вогнутому берегу макроизлучины русла). Левый склон палеоруслу пологий, представляет собой обширный побочень выпуклого берега с отметками поверхности 145–146 м абс. Днище палеоруслу фиксируется по контакту аллювия с коренными меловыми мергелями, минимальная отметка 134 м абс. Таким образом, диапазон отметок (11–12 м) здесь примерно такой же, что и в палеорусле р. Свапы, но ширина вреза превосходит 1500 м.

В заполнении палеоруслу выделяется три основных стратиграфических горизонта. Нижний – тонко-мелкозернистый песок, представляет русловую фацию аллювия. Песок перекрыт алевритовыми глинами озерно-старичной фации. Основание толщи датировано по общей органике временем около 16.7 и 15.0 тыс. кал.л.н. (^{14}C даты 13800 ± 85 (Ki-6984), Ki-6984, и 12630 ± 70 , Ki-6985, соответственно). Из этих дат окончанию активного формирования палеоруслу отвечает первая, более древняя. Вторая дата соответствует этапу заиления палеоруслу, в ходе которого образовалась своеобразная форма – крупный вал шириной 200 м, следующий изгибу макроизлучины и сложенный глинистыми осадками, аналогичными отложениям старичного

¹ Здесь и далее в тексте и всюду на рисунках радиоуглеродные даты калиброваны по Intcal13, т.е. приведены к календарной (астрономической) шкале времени, на что указывает индекс “кал.” Оптико-люминесцентные (ОСЛ) возраста сразу даются в астрономической шкале, для них индекс “кал.” не указывается. Радиоуглеродные возраста (даты в том виде, в каком они получены в лаборатории) помечены как ^{14}C .”



Макроизлучины реки Свайты (А) и поперечный буровой профиль через палеоруло у д. Семеновка (Б)
 1 – средний песок; 2 – суглинки; 3 – супеси; 4 – торф; 5 – скважины; даты: 6 – калиброванные радиоуглеродные, 7 – ОСЛ

заполнения палеорула. Возраст глинистых осадков вала 14.5 ± 0.8 тыс.л.н., полученный ОСЛ методом, хорошо соответствует возрасту осадков в основании левой части толщи заполнения (вторая, более молодая из двух радиоуглеродных дат). Очевидно, это свидетельствует о перемыке отложений палеорула уже в пойменном режиме, после его отмирания. Отметка вершины вала (147 м абс., или 3.5 м над меженью) указывает на возможную высоту половодий Сейма в этот этап развития рула.

Таким образом, установлены признаки переработки поперечного профиля палеорула уже после его отмирания. Кроме того, дно палеорула находилось значительно ниже дна современной рула, и в результате заполнения руслового вреза глинистой толщей под уровень современной поймы палеорула кажется шире, чем в реальности. На буровом поперечнике ширина вреза почти в два раза больше, чем средняя ширина на всем протяжении палеорула, измеряемая на аэрофотоснимках (750 м). Уровень руслонаполнения определить сложно, возможно он был ниже отметок 146–147 м абс. В таких условиях расчет расхода воды становится слишком неточным.

Неопределенная ситуация возникает и при интерпретации поперечного профиля палеорула р. Хопер у пос. Танцирей [13]. Днище палеорула выделяется достаточно уверенно по литологическому контакту между русловыми песками и заполняющими врез палеорула супесями и суглинками на отметках 93.6–94 м. Но поверхности поймы и первой террасы сильно переработаны эоловыми процессами, поэтому бровка поймы плохо выражена. Диапазон отметок возможного уровня руслонаполнения составляет более 1 м (98–99.5 м). Ширина палеорула определяется неуверенно, у левого берега был расположен обширный побочень, осложненный гривами с максимальными отметками вершин 96.5 м. Предположительно, в рассматриваемом сечении палеорула за ухвостьем побочня располагался затон с малыми скоростями течения (см. рис. 3 в приложении [12]). По основному руслу в бровках поймы могло проходить $3600 \text{ м}^3/\text{с}$ воды, и примерно $1500\text{--}2000 \text{ м}^3/\text{с}$ могло идти по побочням.

Еще более сложно рассчитывать сток воды по палеорулу р. Хопер у с. Уютное (см. рис. 4 в приложении [12]). Во-первых, буровой профиль был заложен в вершине пологой излучины палеорула, в плесовой ложине. Во-вторых, форма вреза и датировки заполняющих его отложений заставляют предположить, что происходила существенная трансформация рельефа палеорула, возможно, неоднократная. В-третьих, правый склон палеорула формирует обширный побочень с отметками поверхности 94–95 м абс., а пойма времени формирования палеорула не выражена. Если исходить из такой же величины уровня наполнения рула, что и для палеорула у пос. Танцирей, то рассчитанный расход воды составит 20 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$, что маловероятно. Этот поперечник невозможно использовать для оценок палеорасходов воды.

Гораздо более достоверные расчеты можно провести для более молодого палеорула р. Хопер в староречьях Белозерка. Здесь буровой профиль заложен в области смены знака кривизны оси палеорула, границы вреза устанавливаются по четкому литологическому контакту, сам врез имеет трапециевидную форму, отметки унаследованной поймы устойчивы и составляют 95.6 м абс. (см. рис. 5 в приложении [12]). Рассчитанный расход воды $1400 \text{ м}^3/\text{с}$, который на основании радиоуглеродных датировок можно отнести к позднему дриасу – предбореалу, более чем вдвое больше современного руслонаполняющего расхода воды в сужениях долины Хопра.

Два поперечника были разбурены в палеоруле р. Москвы у д. Остров [14], на перекате в области смены знака кривизны оси палеорула и на плесе в вершине макроизлучины (см. рис. 6 в приложении [12]). На обоих профилях форма палеорула реконструируется вполне достоверно по четкому литологическому контакту толщи заполнения и руслового аллювия (или коренных пород). Здесь главная проблема заключается в назначении уровня наполнения рула. Так как руло врезанное, его борта расположены выше этого уровня. Отметки поверхности толщи заполнения вреза палеорула составляют 117.5–117 м абс. На поперечном сечении в плесе четко выявляется перегиб на отметках 116–166.5 м абс., соответствующий, по-видимому,

поверхности высоких прирусловых отмелей. На отметках 118 м абс. расположена поверхность унаследованной поймы в пределах Люберецкой макроизлучины р. Москвы. Все это позволяет оценить уровень водной поверхности при руслонаполнении в 117.5 на перекате и 117 м абс. в нижележащем плесе. Рассчитанные расходы воды составили 5400–5700 м³/с, что примерно в 6 раз больше современных (до зарегулирования реки).

Палеорусло р. Протвы в г. Боровск [14] также врезанное, разбурено на перекате в области смены знака кривизны оси палеорула (см. рис. 7 в приложении [12]). Форма палеорула реконструируется достоверно по литологическому контакту толщ заполнения и грубозернистого руслового аллювия. Уровень водной поверхности при руслонаполнении также устанавливается достаточно точно по отметкам поверхности на шейке макроизлучины 140 м абс. Коэффициенты шероховатости n для русел-аналогов, подобранных по морфологии палеорула, варьируют в широких пределах от 0.02 до 0.06, поэтому для оценки коэффициента Шези выбрана формула (4). Рассчитанный расход воды составил 1600 м³/с, что примерно в 4 раза больше современного.

Из всех исследованных палеоруло р. Вычегды у п. Вычегодский самое молодое, формировалось около 4.5 тыс. кал.л.н. [15]. Однако проблемы в интерпретации морфологии его вреза те же, что и для более древних палеорусел. Отметки бровок поймы и днища палеорула реконструируются вполне уверенно (см. рис. 8 в приложении [12]). Однако ширина активной части русла восстанавливается с большой степенью неопределенности, так как у левого берега расположена система побочной, которые участвовали в стеснении русла и его горизонтальном перемещении. С учетом этого обстоятельства рассчитанный расход воды составил 4150 м³/с, что примерно в полтора раза меньше современного. Этот результат на качественном уровне хорошо соответствует геоморфологическим данным: ширина палеорула заметно меньше ширины современного русла; кроме того, в отличие от образующего пологие изгибы разветвленно-извилистого современного русла, палеоруло образует крутые петлеобразные излучины, что в условиях неизменного уклона дна долины возможно лишь, если сток был меньше современного.

Рассмотренные примеры гидроморфологических реконструкций по буровым профилям через палеорула разного размера и возраста показывают главные достоинства и недостатки гидравлических методов восстановления расходов воды в древних реках. Если живое сечение палеорула и положение бровок поймы определяются достаточно уверенно (как в случае палеорула р. Свапы на рис. 1), ошибка в расчете руслонаполняющего расхода воды примерно такая же, как и для оценки пропускной способности современных русел. Она составляет 10–15% и существенно меньше, чем при использовании для этих целей метода морфометрических зависимостей [1]. Часто нет такой однозначности в интерпретации результатов бурения и ошибка в оценке расхода воды существенно больше. Но структура этой ошибки ясна из формулы 5 и вполне возможна некоторая корректировка вычислений.

Обычно этот рассчитанный руслонаполняющий палеорасход сравнивается с расходом воды при уровне наполнения современного русла; на этом основании делается вывод об изменении водоносности реки [4]. Известно [16], что на большинстве равнинных рек высота т.н. «высокой» поймы близка к уровню среднего половодья, т.е. руслонаполняющий расход близок к среднему максимальному. Следовательно

$$Q_{cp} = \frac{yQ_{pn}}{100}, \quad (6)$$

$$\text{где } y = \left(100 \frac{Q_{mean}}{Q_{max}} \right) = aF^N. \quad (7)$$

Коэффициент a и показатель степени N для древних рек определяются по данным регионов-аналогов (см. [1]); обычно позднеледниковые большие реки формировали свои русла при большей внутригодовой неравномерности стока, чем реки современные. При этом необходимо учитывать, что расход при уровне руслонаполнения зависит еще и от высоты пойменных бровок, которые могут существенно изменяться по длине реки даже на небольшом участке. Поэтому формулы (6–7) применимы для рек с высокой поймой и малой поемностью.

Заключение

Гидравлические методы реконструкции расходов палеорек базируются на хорошо разработанных методах для оценки пропускной способности современных речных русел. Существует обширная справочная литература [2, 6–10] по применению этих методов. Хотя задача оценки гидравлических сопротивлений еще далека от теоретического решения [17], большой накопленный эмпирический материал позволяет проводить расчеты пропускной способности русел с точностью 10–15%. Такая же точность доступна для оценки руслонаполняющего расхода в палеорусле при правильном выборе расчетного живого сечения и реконструкции его морфометрии: отметок бровок поймы, ширины палеорусла на этих отметках, средней глубины и уклона. При этих условиях гидравлические методы восстановления расходов воды древних рек дают существенно более определенные результаты, чем при использовании метода морфометрических зависимостей. Недаром эти методы получили широкое распространение для оценок катастрофических палеорасходов воды по отметкам высоких вод в слабо деформируемых руслах [18].

Для деформируемых палеорусел неопределенность в оценке древних расходов воды существенно увеличивается. Изменение формы живого сечения палеорусла в процессе его захоронения, неясность в определении литологических контактов руслового аллювия и толщи заполнения, неточности в определении уклона палеорусла, приводят к увеличению ошибки этой оценки. Следует отметить, что эти же факторы увеличивают ошибки реконструкции палеорасходов воды и другими методами, например, с помощью морфометрических зависимостей. Но если в последнем случае ошибка метода неявна и определяется по разбросу эмпирических связей, то ошибка гидравлических расчетов описывается конкретными точными формулами (типа формулы 5), а поэтому ясны пути ее уменьшения.

Переход от руслонаполняющего расхода к среднему расходу воды осуществляется уже по эмпирическим связям, таким, как формула 7. Это существенно снижает точность расчетов, так как ошибки эмпирических зависимостей неявны и их сложно уменьшить. Поэтому точность гидравлического и морфометрического методов при оценке среднего расхода воды примерно одинакова и составляет около 30–40%.

Благодарности. Выполнено по теме “Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок (ГЗ)” (А.Ю. Сидорчук) и при поддержке РФФИ (проект № 15-05-00706) (А.В. Панин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины поверхностного стока в геологическом прошлом (ст. 1. Морфометрические зависимости) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 55–65.
2. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 311 с.
3. Dury G.H. Theoretical implications of underfit streams // US Geological Survey Professional Paper 452-B. 1965. 43 p.
4. Page K.J., Kemp J., and Nanson G.C.: Late Quaternary evolution of Riverine Plain paleochannels, Southeastern Australia // Australian Journal of Earth Sciences. 2009. Vol. 56. P. 19–33.

5. *Rotnicki K.* Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications // *Temperate Palaeohydrology*. Chichester: John Wiley and Sons, 1991. P. 431–470.
6. *Лелявский С.* Введение в речную гидравлику. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 228 с.
7. *Гангила Е., Куттер В.* Новая общая формула для однообразного движения воды в каналах и реках. СПб.: Типография МПС, 1882. 96 с.
8. *Срибный М.Ф.* Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов по способу бытовых морфологических характеристик. М.—Л.: Гострансиздат, 1932. 148 с.
9. *Чоу В.Т.* Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
10. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 418 с.
11. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Баслеров С.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Шеремяцкая Е.Д.* Основные этапы истории речных долин центра Русской равнины в позднем валдае и голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Сейм // *Геоморфология*. 2001. № 2. С. 19–34.
12. http://www.fluvial-systems.net/geomorfologiya_2016/paper2_supplement.html
13. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В.* Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2013. № 1. С. 118–129.
14. *Sidorchuk A., Panin A., and Borisova O.* Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European plain) during the Late Glacial period // *Geomorphology*. 2009. Vol. 113. No. 3–4. P. 137–157.
15. *Sidorchuk A., Borisova O., Kovalukh N., and Panin A.* Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychegda // *River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change*. Amsterdam: Swets & Zeilinger B.V., 2001. P. 265–296.
16. *Маккавеев Н.И.* Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 201 с.
17. *Гришанин К.В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 182 с.
18. *Baker V.R.* Geomorphological understanding of floods // *Geomorphology*. 1994. No. 10. P. 139–156.

Поступила в редакцию 28.02.2016

GEOMORPHOLOGICAL APPROACH TO THE RIVER RUNOFF EVALUATION IN THE GEOLOGICAL PAST

(Paper 2. Estimation of river palaeo-discharges based on channel hydraulics)

A. Yu. SIDORCHUK¹, A.V. PANIN^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

²*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

e-mail: fluvial05@gmail.com, a.v.panin@yandex.ru

Summary

The methods of open channel hydraulics, designed to calculate the capacity of canals and river channels, can be used to determine the hydraulic and hydrological characteristics of ancient river channels. Large available empirical data allows calculations of channel capacity with an accuracy of 10–15%. The same accuracy is possible for the calculation of bankfull paleochannel discharge in the conditions of correct choice of the cross-section and the reconstruction of its morphometry: altitude of floodplain edges, paleochannel width at bankfull stage, average depth and surface slope of the flow. Morphometric characteristics of ancient channels and particle size distribution of alluvial deposits are obtained by detailed coring at channel cross-sections. In modern rivers, straight channel reaches without backwater effects, flow divergence or convergence are usually selected for the calculation of discharges with Chezy formula. Given that, coring of meandering paleochannels is rational to be organized at straight insertions between two adjacent bends. These reaches correspond to shallow crosses with low longitudinal and lateral flow non-uniformity and negligible backwater effects at high water levels.

The most reliable results can be obtained for the non-deformable (slightly deformable) paleochannels. The uncertainty in the estimation of ancient discharges increases significantly for

deformable paleochannels. Changes in the paleochannel cross-section shape during its conservation, the uncertainty in the determination of textural contacts in alluvium and filling deposits, errors in determining of paleochannel slope lead to an increase in the total error of a palaeo-discharge estimate. The conversion from the bankfull discharge to a discharge of another frequency (i.e. to annual or mean maximum discharge) is processed with the help of empirical equations. This reduces significantly the accuracy of the calculations, since the empirical relationships are characterized by implicit errors, which are difficult to identify and reduce. Therefore, the accuracy of the hydraulic methods for estimating the annual discharge is about the same as that of the morphometric methods (regime equations), i.e. about 30–40%.

Keywords: the Late Glacial time, the Holocene, paleochannels, open channel hydraulics, channel capacity, water discharge reconstruction.

DOI:10.15356/0435-4281-2017-2-3-13