

А. А. Чемагин

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИКИ РЕЧНЫХ УЧАСТКОВ РУСЛОВЫХ ЗИМОВАЛЬНЫХ ЯМ РЕКИ ИРТЫШ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ

Показаны и описаны особенности гидравлики русла р. Иртыш на участках значительных концентраций рыб – зимовальных ямах – в период открытой воды. Изучены акватории наиболее крупных (как по площади, так и по глубине) Горнослинкинской и Кондинской зимовальных русловых ям, расположенных в Уватском и Ханты-Мансийском районах Тюменской области и Ханты-Мансийского автономного округа соответственно. Батиметрические характеристики ям изучены с помощью компьютеризированного гидроакустического комплекса AsCog (ООО «Промгидроакустика», г. Петрозаводск). Для построения рельефа дна русловых ям использован пакет геоинформационных программ Surfer 9.0, Map Viewer 6.0. Исследование видового состава рыбного населения проводилось контрольным ловом разноячейными ставными и плавными сетями. Установлено, что в результате совокупности ряда особенностей русла на исследуемых участках формируется сложная гидродинамическая и турбулентная среда. Ямы расположены на меандрах с показателями высокой кривизны поворота русла, отмечены створы с сужающимся руслом на входе в поворот. При сужении русла происходит заглубление динамической оси потока и размыв дна, что, вероятно, препятствует заилению ям. В результате значительных перепадов глубин возникает компенсационное течение. Из-за поворота русла в акваториях формируются водоворотные зоны, а возникающие поперечные течения воды замыкают поверхностные и донные струи потока реки. Гетерогенная гидродинамическая среда Кондинской ямы усложняется впадением р. Конда на повороте в р. Иртыш, в результате происходит обмен импульсами рек. Таким образом, при наложении продольной скорости потока на поперечные течения возникают спиралеобразное движение водных масс и вертикальные вихревые структуры – водовороты, в результате чего формируется оптическая (мутность) и турбулентная (гидродинамическая) неоднородность водной толщи русловых зимовальных ям.

**Ключевые слова:** скопления рыб, кривизна меандры, водоворот, поперечное течение, Обь-Иртышский бассейн, зимовальная яма.

### Введение

Река Иртыш – наиболее крупный левобережный приток реки Обь, общая площадь водосбора 1 643 тыс. км<sup>2</sup>. Наиболее значительные притоки, в том числе р. Конда, отмечены в нижнем течении на участке от г. Тобольска. Скорость течения в период половодья может превышать 1 м/с. Глубины на плесах достигают 25 м и более, ширина русла реки – до 1 200 м [1]. На меандрах образуются участки со значительными глубинами, где могут формироваться русловые ямы, имеющие важное значение для сохранения водных биологических ресурсов всего Обь-Иртышского бассейна, на этих участках круглогодично запрещено рыболовство. К наиболее крупным из них – как по площади, так и по глубине – относятся Горнослинкинская и Кондинская, которые расположены в нижнем течении р. Иртыш в пределах Уватского и Ханты-Мансийского районов Тюменской области и Ханты-Мансийского автономного округа соответственно. Скопления рыб на этих участках русла образуются круглогодично. В глубоководной части ям в результате резкого поворота русла наблюдаются вихри (водовороты) [2, 3], образующиеся из-за турбулентного кругового вращения водных масс [4, 5], и облака повышенной мутности («облака вскипания»), образование которых является следствием крупномасштабных вихревых структур, поднимающих взвешенные частицы со дна к поверхности воды [6]. Резкие колебания движений водных масс и перенос частиц грунта в водную толщу формируют гидродинамическую и оптическую неоднородность среды, которую различные водные организмы используют в качестве укрытий от хищников [7–9], при этом условия кормления гидробионтов могут как улучшаться [10], так и ухудшаться [11].

*Цель работы* – выявить особенности гидравлики речных участков русловых зимовальных ям, формирующих турбулентность и повышенную мутность.

### Материал и методика

Исследования выполнены в период открытой воды 2014–2017 гг. в акватории Горнослинкинской и Кондинской русловых ям на территории Тюменской области и Ханты-Мансийского автономного округа-Югры соответственно. Для определения батиметрических характеристик русла использовали программно-технический гидроакустический комплекс AsCor (ООО «Промгидроакустика», г. Петрозаводск). В основе методики работы с данным комплексом используется серийный эхолот Furuno с двойным лучом вертикального обзора и рабочими частотами 50 и 200 кГц. Вместе с эхолотом в систему встроены аналогово-цифровой преобразователь сигнала и GPS-приемник. Выполняемая гидроакустическая съемка с батиметрическими характеристиками исследуемого участка реки записывается на полевой планшет, при этом по изучаемым акваториям передвигается моторная лодка по сетке галсов (зигзагами) согласно общепринятым методикам проведения гидроакустических съемок [12]. Запись гидроакустической съемки обрабатывают в лабораторных условиях с помощью программных приложений. Для построения визуализации рельефа дна используется геоинформационная программа Surfer 9.0: интерполяционный метод кригинга («Kriging method») и метод 3D Surface. Перед построением планшета карта исследуемого участка реки предварительно калибруется в программе Map Viewer 6.0, в которую импортируется снимок данной территории из программы Google Earth Pro в формате JPEG. Показатель кривизны меандра (изгибов русла) рассчитывается как отношение ширины русла ( $W$ ) до вхождения в поворот к радиусу поворота ( $R$ ), определяемого по стрежню [13, 14] на исследуемом участке реки. Если данное соотношение превышает 0,5, то кривизна меандры (поворот) считается высокой. Для определения видового состава рыб выполняли контрольный лов рыбы разноячейными ставными и плавными сетями (размер ячеи 14, 25, 35, 45, 55, 65 мм, длина сети 35–75 м).

### Результаты исследований и их обсуждение

По данным контрольного лова в районе исследований рыбное население представлено следующими видами: стерлядь (*Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758); сибирский осетр (*Acipenser baerii* Brandt); нельма (*Stenodus leucichthys nelma* Pallas, 1773); пелядь (*Coregonus peled* Gmelin, 1788); муксун (*Coregonus muksun* Pallas, 1814); плотва (*Rutilus* Linnaeus, 1758); язь (*Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758)); елец (*Leuciscus* (Linnaeus, 1758)); лещ (*Abramis brama* Linnaeus, 1758); золотой карась (*Carassius* Linnaeus, 1758); серебряный карась (*Carrassius auratus* Linnaeus, 1758); окунь (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758); ерш (*Gymnocephalus cernuus* Linnaeus, 1758); судак (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758); щука (*Esox lucius* Linnaeus, 1758); налим (*Lota* Linnaeus, 1758). Доминируют карповые виды рыб.

В результате анализа акваторий Горнослинкинской и Кондинской русловых ям установлено, что рассматриваемые участки рек расположены на меандрах с высокой кривизной, значения которой равны 0,560 (620/1050 м) и 0,546 (610/1120 м) соответственно. Схематическое изображение гидрологических особенностей исследуемых участков представлено на рис. 1 [13, 14].

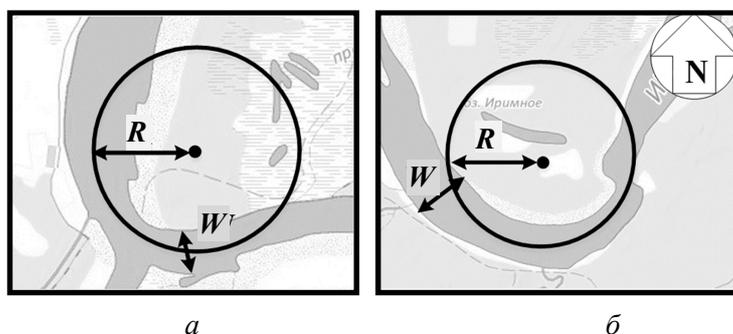


Рис. 1. Карта-схема течений, циркуляций и кривизны меандр русла на участках р. Иртыш с Кондинской (а) и Горнослинкинской (б) зимовальными ямами

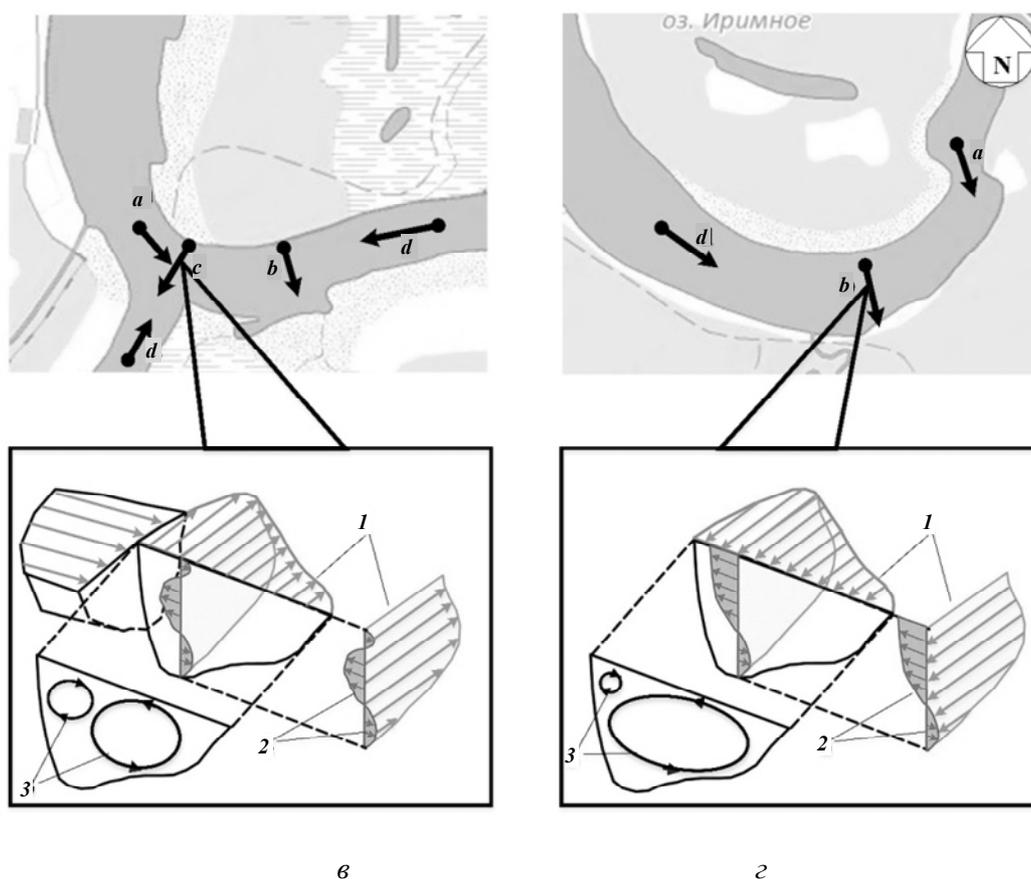


Рис. 1 (окончание). Карта-схема течений, циркуляций и кривизны меандр русла на участках р. Иртыш с Кондинской (6) и Горнослинkinской (2) зимовальными ямами:

- a* – компенсационное течение, образующееся в результате резкого перепада глубин;
- b* – поперечное течение, образующееся в результате меандрирования реки;
- c* – поперечное течение, образующееся в результате меандрирования и боковой приточности (обмен импульсами рек); *d* – направление основного течения рек;
- 1* – направление основного течения;
- 2* – направление струй потока на участке меандры;
- 3* – поперечные циркуляции, формирующиеся на меандрах

Другой важной особенностью исследуемых участков реки является наличие створов резкого сужения основного русла, предшествующих глубоководной части этих акваторий: на участке Кондинской ямы на 51,61 % (с 620 до 320 м), Горнослинkinской на 51,15 % (с 610 до 312 м). Как следствие, возрастает трение потока о боковые стенки русла, в результате чего динамическая ось потока заглубляется, активизируются эрозионные процессы дна реки. При тормозящем действии боковых частей русла при его сужении [15] возникают вертикальные циркуляционные течения водных масс [16]. В результате частицы грунта переносятся к внутренней стороне русла, формируя намывные гряды и гребни [16–19], такое явление отмечено на исследуемых участках в виде намывных песчаных пляжей в левобережной части Горнослинkinской и правобережной части Кондинской русловых ям.

Установлено [14], что глубины русла реки на изгибе показывают высокую корреляцию со значениями кривизны при  $W/R > 0,5$ . В первой половине меандр на участках с резкими поворотами максимум скоростей смещается к выпуклому берегу, во второй половине и ниже по течению – к вогнутому. В результате возникают поперечные циркуляционные течения в русле реки, которые в дальнейшем затухают на прямолинейном участке [3]. При описываемых значительных уклонах в продольном направлении (перепадах глубин) с 12–16 до 42–43 м (рис. 2) стабилизация течения потока в сформированной гидродинамической среде происходит [20] в среднем на участке реки протяженностью 50 значений глубин, т. е. порядка 2 км.

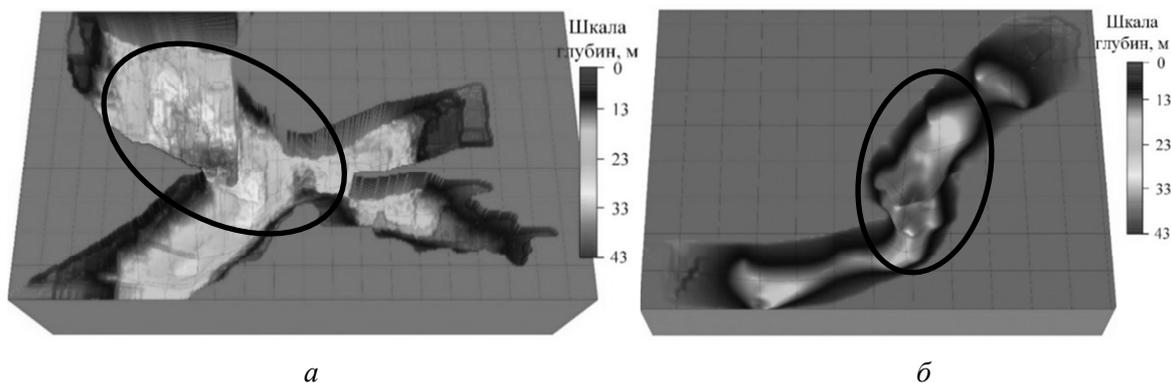


Рис. 2. Визуализация 3D рельефа дна Кондинской (а) и Горнослинkinской (б) русловых ям (овалом выделены глубоководные зоны, где отмечаются наибольшие скопления рыб)

При наличии донных русловых образований обтекание их речным потоком имеет сложный характер, в результате чего возникают отрывные зоны, резкие локальные изменения влекущей силы речного потока [6].

При взаимодействии описываемых гидрологических особенностей в акваториях русловых ям наблюдаются облака повышенной мутности (так называемые «облака вскипания» [6]), появление которых связано с поступлением большого числа взвешенных частиц из придонных слоев водного горизонта потока в результате действия мощных турбулентных пульсаций скорости речного потока. Исследования данного явления показали [6], что оно связано с крупномасштабными вихревыми турбулентными структурами, которые транспортируют взвешенные частицы от дна в толщу и к поверхности воды. В свою очередь, по данным [21], турбулентностью принято считать неупорядоченное движение в жидкости при обтекании ею непроницаемых поверхностей и в случаях взаимодействия различных потоков либо их взаимного проникновения. При всей сложности взаимосвязанных гидрологических особенностей и явлений, возникающих на исследуемых участках реки, здесь наблюдается концентрация массовых видов рыб Нижнего Иртыша, в том числе и ценных – стерляди, сибирского осетра и нельмы.

При меандрировании р. Иртыш в нижнем течении наблюдаются резкие изгибы русла, на которых в результате взаимодействия совокупности факторов (пространственные особенности батиметрических характеристик ложа, кривизна изгиба, наличие коренных пород и т. д.) формируется сложное спиралеобразное скручивание потока [22, 23] и образование гетерогенной динамической водной среды [22, 24] с пульсациями скоростей разнонаправленных течений и мутности [25].

В горизонтально движущемся потоке на исследуемых участках рек при локальном круговом вращении водных масс [4] происходит возникновение вихрей, которые перемещаются вниз по течению со скоростью равной 0,8 средней скорости потока [6], а их интенсивность также коррелирует с кривизной изгиба русла [26]. При этом [3] внутри потока в результате перемещения вихрей (водоворотов) различного размера происходит низко- и высокочастотная пульсация скоростей [27, 28]. Из-за возникающих вихрей в акватории русловых ям моделирование гетерогенной гидродинамической среды со спиралеобразным скручиванием при изгибе русла является настолько сложной задачей, что для этого применяются только методики с использованием 3D визуализации, способные максимально отразить всю сложность среды потока [29].

Внутрирусловые образования значительных размеров, в том числе существенные глубинные участки, создают возмущения в потоке, соизмеримые со средними параметрами речного стока [30]. В результате слияния рек дополнительно формируются крупномасштабные турбулентные вихревые структуры [31] и спиралеобразное скручивание потоков [27] за счет поперечных [16, 18, 19, 32, 33] и обратных компенсационных течений, образующихся на резких изгибах русла и при значительном перепаде глубин.

В акватории Кондинской русловой ямы эти факторы дополняют впадение р. Конда в левобережье р. Иртыш под углом 90° и взаимодействие потоков этих рек [21] с их взаимным проникновением, резким смещением водных масс из бокового притока в нижнюю часть поперечного сечения русла [34], в результате формируются интенсивные турбулентные участки [35].

Показано [36], что несогласованность батиметрических характеристик между сливающимися реками увеличивает интенсивность турбулентности и апвеллинг потоков внутри зоны слияния. При прохождении речного потока над резким свалом глубин в акваториях ям он испытывает сложное гидродинамическое воздействие. Таким образом, в нижней части свала – подвалье – происходит взаимодействие подвижного транзитного потока с водными массами из зоны подвалья, что приводит их в движение. Водные массы подвалья, вовлеченные в поток, образуют обратное компенсационное течение [16]. При таком взаимодействии происходит значительное изменение характеристик потока и обмен импульсами рек [37]. Установлено [34, 38], что ниже по течению зоны слияния потоков наблюдается эрозия ложа, которая, в свою очередь, дополняет размыв подвалья русловой ямы.

Возникающие возвратные течения и вихри [39] выполняют дальнейшее разрушение (размыв) подвалья [37], не давая образовываться в этой области грядам и другим русловым донным образованиям. Дополнительно показано, что на изгибах русла формируется сильный нисходящий поток со значительными скоростями, который концентрируется в нижней части поперечного сечения и поддерживает большую глубину размыва [18], препятствуя заилению русловых ям.

Отклонение струи потока, возникающее при меандрировании русла реки, обязательно приводит к размыву берегов и образованию поперечных циркуляционных течений в потоке [19]. На таких изгибах русел многие исследователи [3, 16–18, 27, 32, 33, 40, 41] отмечают наличие донных поперечных течений, начинающихся выше входного створа и направленных от вогнутого берега к выпуклому. Поверхностные струи потока смещаются к вогнутому берегу несколько выше входного створа [19, 42]. В результате взаимодействия противоположно направленных поверхностных и придонных струй потока на изгибах русла в поперечном сечении потока образуется от одного до нескольких замкнутых циркуляционных течений [17, 18]. Одно циркуляционное течение, как правило, занимает большую площадь поперечного сечения, остальные имеют второстепенное значение. Сила поперечной циркуляции зависит от степени кривизны русла и скорости продольного течения [26, 41]. На поверхности потока р. Иртыш в акватории обоих русловых ям отмечаются ровные полосы – зоны встречи двух циркуляционных течений, такие течения называют сбоями или сбойными [3]. На участке Кондинской ямы множество сбойных течений отмечено в месте впадения р. Конда в р. Иртыш. Кроме того, показано [43], что при слиянии водотоков впадающий боковой приток может усиливать поперечные циркуляции [27] основного изгибающегося потока путем передачи импульса водных масс при условиях [44] разницы глубин сливающихся потоков минимум на 25 % и соразмерных скоростях течения. В зоне слияния скорость потоков может возрасти, а зоны их максимальных скоростей в поперечном сечении перемещаются в нижнюю часть потока [45]. При этом показано [40] образование застойной зоны жидкости непосредственно перед участком слияния и боковое отклонение второстепенного потока (р. Конда) – доминирующим (р. Иртыш). Впадение второстепенной реки под прямым углом на изгибе доминирующей создает взаимное отклонение потоков, в результате чего поток второстепенной реки резко смещается в нижнюю часть доминирующей, поток которой отклоняется от внешнего берега, при этом отмечают значительную эрозию дна доминирующей реки [34]. Дополнительно показано [34], что на участках слияния рек под острым углом значительных скоплений рыб не обнаруживают.

### **Заключение**

Таким образом, в акваториях зимовальных русловых ям в местах скопления рыб отмечена совокупность особенностей русла, способствующих формированию поперечных циркуляций (течений) воды и вертикальных вихревых структур. Основная причина возникновения поперечных циркуляций на отмеченных меандрах русла – центробежная сила инерции, развивающаяся в водной массе, и связанный с этим поперечный уклон поверхности воды, причиной возникновения водоворотов является высокий показатель кривизны меандры. При спиралеобразном движении водных масс и вертикальных вихревых структур происходит пульсация мутности и скорости разнонаправленных течений, в результате чего формируется сложная оптическая и турбулентная гидродинамическая неоднородность водной толщи русловых ям, в которой концентрируются массовые виды рыб Нижнего Иртыша, в том числе и ценные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтай и Западная Сибирь. Нижний Иртыш и Нижняя Обь // Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 15. Вып. 3. 423 с.
2. Великанов М. А. Руслевой процесс: основы теории. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 395 с.
3. Барышников Н. Б. Динамика руслевых потоков: учеб. СПб.: РГМУ, 2007. 314 с.
4. Овсяник М. В. Образование водоворота, смерча // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Физико-математические науки. 2016. № 7 (28). С. 78–84.
5. Верин О. Г. Идеальный вихрь: воронка, вихревой шнур, тороидальный вихрь. URL: <http://nauka.info/files/files/1450991403.pdf>. (дата обращения: 09.11.2017).
6. Боровков В. С. Руслевые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 286 с.
7. Jacobsen L., Perrow M. R. Predation risk from piscivorous fish influencing the diel use of macrophytes by planktivorous fish in experimental ponds // Ecology of Freshwater Fish. 1998. N. 7. P. 78–86. DOI: 10.1111/j.1600-0633.1998.tb00174.x.
8. Gliwicz M. Z., Slon J., Szykarczyk I. Trading safety for food: evidence from gut contents in roach and bleak captured at different distances offshore from their daytime littoral refuge // Freshwater Biology. 2006. N. 51. P. 823–839. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01530.
9. Hansen A. G., Beauchamp D. A. Latitudinal and photic effects on diel foraging and predation risk in freshwater pelagic ecosystems // Journal of Animal Ecology. 2015. N. 84. P. 532–544. DOI: 10.1111/1365-2656.12295.
10. Härkönen L., Pekcan-Hekim Z., Hellén N., Ojala A., Horppila J. Combined Effects of Turbulence and Different Predation Regimes on Zooplankton in Highly Colored Water – Implications for Environmental Change in Lakes // PLOS ONE. 2014. N. 9 (11). P. 1–13. DOI: org/10.1371/journal.pone.0111942.
11. Jaspers C., Costello J. H., Sutherland K. R., Gemmell B., Lucas K. N., Tackett J., Dodge K., Colin S. P. Resilience in moving water: Effects of turbulence on the predatory impact of the lobate ctenophore *Mnemiopsis leidyi* // Limnology and oceanography. 2018. N. 63. P. 445–458. DOI: 10.1002/lno.10642.
12. Юданов К. И., Калихман И. Л., Теслер В. Д. Руководство по проведению гидроакустических съёмки. М.: ВНИРО, 1984. 1124 с.
13. Blanckaert K. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116. P. 1–22. DOI: 10.1029/2010JF001806.
14. Vermeulen B., Hoitink A. J. F., Berkum van S. W., Hidayat H. Sharp bends associated with deep scours in a tropical river: The river Mahakam (East Kalimantan, Indonesia) // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2014. Vol. 119. P. 1441–1454. DOI: 10.1002/2013JF002923.
15. Гончаров В. Н. Равномерный турбулентный поток. М.; Л.: Гос. энергет. изд-во, 1951. 146 с.
16. Blanckaert K., Kleinhans M. G., McLelland S. J., Uijttewaal W. S. J., Murphy B. J., van de Kruijs A., Parsons D. R., Chen Q. Flow separation at the inner (convex) and outer (concave) banks of constant-width and widening open-channel bends // Earth Surface Processes and Landforms. 2013. N. 38. P. 696–716. DOI: 10.1002/esp.3324.
17. Zeng J., Constantinescu G., Blanckaert K., Weber L. Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions // Water Resources Research. 2008. N. 44. P. 1–22. DOI: 10.1029/2007WR006303.
18. Vermeulen B., Hoitink A. J. F., Labeur R. J. Flow structure caused by a local cross-sectional area increase and curvature in a sharp river bend // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2015. N. 120. P. 1771–1783. DOI: 10.1002/2014JF003334.
19. Konsoer K. M., Rhoads B. L., Best J. L., Langendoen E. J., Abad J. D., Parsons D. R., Garcia M. H. Three-dimensional flow structure and bed morphology in large elongate meander loops with different outer bank roughness characteristics // Water Resources Research. 2016. N. 52. P. 9621–9641. DOI: 10.1002/2016WR019040.
20. Богомолов А. И., Боровков В. С., Майрановский Ф. Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
21. Хинце И. О. Турбулентность. Её механизм и теория. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. 680 с.
22. Dorrell R. M., Darby S. E., Peakall J., Sumner E. J., Parsons D. R., Wynn R. B. Superelevation and overspill control secondary flow dynamics in submarine channels // Journal of geophysical research. Oceans. 2013. N. 118. P. 3895–3915. DOI: 10.1002/jgrc.20277.
23. Engel F. L., Rhoads B. L. Three-dimensional flow structure and patterns of bed shear stress in an evolving compound meander bend // Earth Surface Processes and Landforms. 2016. N. 41. P. 1211–1226. DOI: 10.1002/esp.3895.
24. Sebok E., Duque C., Engesgaard P., Boegh E. Spatial variability in streambed hydraulic conductivity of contrasting stream morphologies: channel bend and straight channel // Hydrological Processes. 2015. N. 29. P. 458–472. DOI: 10.1002/hyp.10170.
25. Караушев А. В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 418 с.
26. Dargahi B. Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the River Klarälven // Earth Surface Processes and Landforms. 2004. N. 29. P. 821–852. DOI: 10.1002/esp.1071.
27. Bradbrook K. F., Lane S. N., Richards K. S. Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences // Water Resources Research. 2000. N. 36 (9). P. 2731–2746. DOI: 10.1029/2000WR900011.

28. Rhoads B. L., Sukhodolov A. N. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface // *Water Resources Research*. 2008. N. 44. P. 1–17. DOI: 10.1029/2007WR006634.
29. Alho P., Mäkinen J. Hydraulic parameter estimations of a 2D model validated with sedimentological findings in the point bar environment // *Hydrological Processes*. 2010. N. 24. P. 2578–2593. DOI: 10.1002/hyp.7671 2010.
30. Понов И. В. Загадки речного русла. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 168 с.
31. Constantinescu G., Miyawaki S., Rhoads B., Sukhodolov A., Kirkil G. Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy-resolving numerical simulation // *Water Resources Research*. 2011. N. 47. W05507. DOI: 10.1029/2010WR010018.
32. Kasvi E., Vaaja M., Alho P., Huuypä H., Huuypä J., Kaartinen H., Kukko A. Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2013. N. 38. P. 577–590. DOI: 10.1002/esp.3303.
33. Constantinescu G., Kashyap S., Tokyay T., Rennie C. D., Townsend R. D. Hydrodynamic processes and sediment erosion mechanisms in an open channel bend of strong curvature with deformed bathymetry // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2013. N. 118. P. 480–496. DOI: 10.1002/jgrf.20042.
34. Riley J. D., Rhoads B. L., Parsons D. R., Johnson K. K. Influence of junction angle on three-dimensional flow structure and bed morphology at confluent meander bends during different hydrological conditions // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015. N. 40. P. 252–271. DOI: 10.1002/esp.3624.
35. Sukhodolov A. N., Krick J., Sukhodolova T. A., Cheng Z., Rhoads B. L., Constantinescu G. S. Turbulent flow structure at a discordant river confluence: Asymmetric jet dynamics with implications for channel morphology // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2017. N. 122. P. 1278–1293. DOI: 10.1002/2016JF004126.
36. Boyer C., Roy A. G., Best J. L. Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology // *Journal of Geophysical Research*. 2006. N. 111. F04007. DOI: 10.1029/2005JF000458.
37. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. Интегральные методы расчета. М.: Машиностроение, 1969. 400 с.
38. Ismail H., Viparelli E., Imran J. Confluence of density currents over an erodible bed // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2016. N. 121. P. 1251–1272. DOI: 10.1002/2015JF003768.
39. Знаменская Н. С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 240 с.
40. Rhoads B. L., Sukhodolov A. N. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities // *Water Resources Research*. 2001. N. 37 (9). P. 2393–2410. DOI: 10.1029/2001WR000316.
41. Bever A. J., MacWilliams M. L. Factors influencing the calculation of periodic secondary circulation in a tidal river: numerical modelling of the lower Sacramento River, USA // *Hydrological Processes*. 2016. N. 30. P. 995–1016. DOI: 10.1002/hyp.10690.
42. Zinger J. A., Rhoads B. L., Best J. L., Johnson K. K. Flow structure and channel morphodynamics of meander bend chute cutoffs: A case study of the Wabash River, USA // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2013. N. 118. P. 2468–2487. DOI: 10.1002/jgrf.20155.
43. Lane S. N. Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology: a review of high-resolution approaches // *Hydrological Processes*. 1998. N. 12. P. 1131–1150. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980630)12:8<1131::AID-HYP611>3.0.CO;2-K.
44. Bradbrook K. F., Biron P. M., Lane S. N., Richards K. S., Roy A. G. Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model // *Hydrological Processes*. 1998. N. 12. P. 1371–1396. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980630)12:8<1371::AID-HYP620>3.0.CO;2-C.
45. Rhoads B. L., Kenworthy S. T. Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1998. N. 23. P. 171–191. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199802)23:2<171::AID-ESP842>3.0.CO;2-T.

Статья поступила в редакцию 27.07.2018

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Чемагин Андрей Александрович** – Россия, 626152, Тобольск; Тобольская комплексная научная станция Уральского отделения Российской академии наук; канд. биол. наук; старший научный сотрудник группы экологии гидробионтов; ChemaginAA@yandex.ru.



A. A. Chemagin

## FEATURES OF HYDRAULICS OF THE RIVER SECTORS WITH RIVERBED WINTERING HOLES OF THE IRTYSH IN OPEN WATER PERIOD

**Abstract.** The article describes features of the hydraulics of the Irtysh riverbed in the sections of significant fish concentrations –wintering holes - in the open water period. There have been explored the waters of the largest (in area and in depth) Gornoslinskaya and Kondinskaya riverbed depressions located in the Uvat and Khanty-Mansi districts of the Tyumen region and Khanty-Mansi Autonomous District, respectively. The bathymetric characteristics of wintering holes were studied using computerized hydroacoustic complex AsCor (Promgidroakustika, Ltd., Petrozavodsk). To create the bottom relief of riverbeds there were used geographic information software programs Surfer 9.0 and Map Viewer 6.0. The study of the species composition of the fish population was carried out conducting control catches with stationary and drift nets. It has been found that, as a result of the combination of features of the riverbed, on the investigated sectors there is formed a complex hydrodynamic and turbulent environment. The holes are located on meanders with coefficients of high curvature of the bend of a channel, there have been found the ranges with narrowing channels at the entrance into the turn. In the process of the channel narrowing there occurs deepening of dynamic river flow axis and eroding of the bottom, which may prevent silting of the wintering holes. Significant differences in the depths cause a compensating current. Due to the bend of the riverbed in the water areas there are formed whirlpool zones, and arising transverse water currents close the surface and bottom streams of the river flow. The heterogeneous hydrodynamic environment of the Kondinskaya depression is complicated by the fact that the Konda flows into the bend of the Irtysh; as a result, there takes place an exchange of river impulses. Thus, when the longitudinal flow velocity is imposed on the transverse flows, there appears a spiral movement of the water masses and vertical vortex structures – whirlpools resulting in optical (turbidity) and turbulent (hydrodynamic) heterogeneity in the water column of the riverbed wintering holes.

**Key words:** fish aggregations, curvature of meander, whirlpool, transverse flow, the Ob'-Irtysh basin, wintering hole.

### REFERENSES

1. Altai i Zapadnaia Sibir'. Nizhnii Irtysh i Nizhniaia Ob' [The Altay and the West Siberia. The Lower Irtysh and the Lower Ob']. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973. Vol. 15, iss. 3. 423 p.
2. Velikanov M. A. *Ruslovoi protsess: osnovy teorii* [Riverbed process: theoretical backgrounds]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1958. 395 p.
3. Baryshnikov N. B. *Dinamika ruslovykh potokov: uchebnik* [Dynamics of riverbed flows: textbook]. Saint-Petersburg, RGGMU, 2007. 314 p.
4. Ovsianik M. V. Obrazovanie vodovorota, smercha [Generating a whirlpool and a waterspout]. *Evrasiiskii Soiuz Uchenykh (ESU). Fiziko-matematicheskie nauki*, 2016, no. 7 (28), pp. 78-84.
5. Verin O. G. *Ideal'nyi vikhr': voronka, vikhrevoi shnur, toroidal'nyi vikhr'* [Ideal vortex: crater, vortex cord, toroidal vortex]. Available at: <http://nauka.info/files/files/1450991403.pdf>. (accessed: 09.11.2017).
6. Borovkov V. S. *Ruslovyie protsessy i dinamika rechnykh potokov na urbanizirovannykh territoriiakh* [River channel processes and dynamics of river flows in the urban territories]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989. 286 p.
7. Jacobsen L., Perrow M. R. Predation risk from piscivorous fish influencing the diel use of macrophytes by planktivorous fish in experimental ponds. *Ecology of Freshwater Fish*, 1998, no. 7, pp. 78-86. DOI:10.1111/j.1600-0633.1998.tb00174.x.
8. Gliwicz M. Z., Slon J., Szykarczyk I. Trading safety for food: evidence from gut contents in roach and bleak captured at different distances offshore from their daytime littoral refuge. *Freshwater Biology*, 2006, no. 51, pp. 823-839. DOI:10.1111/j.1365-2427.2006.01530.
9. Hansen A. G., Beauchamp D. A. Latitudinal and photic effects on diel foraging and predation risk in freshwater pelagic ecosystems. *Journal of Animal Ecology*, 2015, no. 84, pp. 532-544. DOI:10.1111/1365-2656.12295.
10. Härkönen L., Pekcan-Hekim Z., Hellén N., Ojala A., Horppila J. Combined Effects of Turbulence and Different Predation Regimes on Zooplankton in Highly Colored Water – Implications for Environmental Change in Lakes. *PLOS ONE*, 2014, no. 9 (11), pp. 1-13. DOI: org/10.1371/journal.pone.0111942.
11. Jaspers C., Costello J. H., Sutherland K. R., Gemmel B., Lucas K. N., Tackett J., Dodge K., Colin S. P. Resilience in moving water: Effects of turbulence on the predatory impact of the lobate ctenophore *Mnemiopsis leidyi*. *Limnology and oceanography*, 2018, no. 63, pp. 445-458. DOI: 10.1002/lno.10642.

12. Iudanov K. I., Kalikhman I. L., Tesler V. D. *Rukovodstvo po provedeniiu gidroakusticheskikh s"emok* [Instructions on conducting hydroacoustic surveys]. Moscow, VNIRO, 1984. 1124 p.
13. Blanckaert K. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications. *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116, pp. 1-22. DOI: 10.1029/2010JF001806.
14. Vermeulen B., Hoitink A. J. F., Berkum van S. W., Hidayat H. Sharp bends associated with deep scours in a tropical river: The river Mahakam (East Kalimantan, Indonesia). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, vol. 119, pp. 1441-1454. DOI: 10.1002/2013JF002923.
15. Goncharov V. N. *Ravnomernyi turbulentnyi potok* [Uniform turbulent stream]. Moscow, Leningrad, Gos. energeticheskoe izd-vo, 1951. 146 p.
16. Blanckaert K., Kleinhans M. G., McLelland S. J., Uijtewaal W. S. J., Murphy B. J., van de Kruijs A., Parsons D. R., Chen Q. Flow separation at the inner (convex) and outer (concave) banks of constant-width and widening open-channel bends. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, no. 38, pp. 696-716. DOI: 10.1002/esp.3324.
17. Zeng J., Constantinescu G., Blanckaert K., Weber L. Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions. *Water Resources Research*, 2008, no. 44, pp. 1-22. DOI: 10.1029/2007WR006303.
18. Vermeulen B., Hoitink A. J. F., Labeur R. J. Flow structure caused by a local cross-sectional area increase and curvature in a sharp river bend. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, no. 120, pp. 1771-1783. DOI: 10.1002/2014JF003334.
19. Konsoer K. M., Rhoads B. L., Best J. L., Langendoen E. J., Abad J. D., Parsons D. R., Garcia M. H. Three-dimensional flow structure and bed morphology in large elongate meander loops with different outer bank roughness characteristics. *Water Resources Research*, 2016, no. 52, pp. 9621-9641. DOI: 10.1002/2016WR019040.
20. Bogomolov A. I., Borovkov V. S., Mairanovskii F. G. *Vysokoskorostnye potoki so svobodnoi poverkhnost'iu* [High velocity streams with open surface]. Moscow, Stroiizdat, 1979. 344 p.
21. Khintse I. O. *Turbulentnost'. Ee mekhanizm i teoriia* [Turbulence. Mechanism and theory]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1963. 680 p.
22. Dorrell R. M., Darby S. E., Peakall J., Sumner E. J., Parsons D. R., Wynn R. B. Superelevation and overspill control secondary flow dynamics in submarine channels. *Journal of geophysical research. Oceans*, 2013, no. 118, pp. 3895-3915. DOI: 10.1002/jgrc.20277.
23. Engel F. L., Rhoads B. L. Three-dimensional flow structure and patterns of bed shear stress in an evolving compound meander bend. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, no. 41, pp. 1211-1226. DOI: 10.1002/esp.3895.
24. Sebok E., Duque C., Engesgaard P., Boegh E. Spatial variability in streambed hydraulic conductivity of contrasting stream morphologies: channel bend and straight channel. *Hydrological Processes*, 2015, no. 29, pp. 458-472. DOI: 10.1002/hyp.10170.
25. Karaushev A. V. *Rechnaia gidravlika* [River hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969. 418 p.
26. Dargahi B. Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the River Klarälven. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, no. 29, pp. 821-852. DOI: 10.1002/esp.1071.
27. Bradbrook K. F., Lane S. N., Richards K. S. Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resources Research*, 2000, no. 36 (9), pp. 2731-2746. DOI: 10.1029/2000WR900011.
28. Rhoads B. L., Sukhodolov A. N. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface. *Water Resources Research*, 2008, no. 44, pp. 1-17. DOI: 10.1029/2007WR006634.
29. Alho P., Mäkinen J. Hydraulic parameter estimations of a 2D model validated with sedimentological findings in the point bar environment. *Hydrological Processes*, 2010, no. 24, pp. 2578-2593. DOI: 10.1002/hyp.7671
30. Popov I. V. *Zagadki rechnogo rusla* [Mysteries of the riverbed]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977. 168 p.
31. Constantinescu G., Miyawaki S., Rhoads B., Sukhodolov A., Kirkil G. Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy-resolving numerical simulation. *Water Resources Research*, 2011, no. 47, W05507. DOI: 10.1029/2010WR010018.
32. Kasvi E., Vaaja M., Alho P., Hyypä H., Hyypä J., Kaartinen H., Kukko A. Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, no. 38, pp. 577-590. DOI: 10.1002/esp.3303.
33. Constantinescu G., Kashyap S., Tokyay T., Rennie C. D., Townsend R. D. Hydrodynamic processes and sediment erosion mechanisms in an open channel bend of strong curvature with deformed bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, no. 118, pp. 480-496. DOI: 10.1002/jgrf.20042.
34. Riley J. D., Rhoads B. L., Parsons D. R., Johnson K. K. Influence of junction angle on three-dimensional flow structure and bed morphology at confluent meander bends during different hydrological conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, no. 40, pp. 252-271. DOI: 10.1002/esp.3624.
35. Sukhodolov A. N., Krick J., Sukhodolova T. A., Cheng Z., Rhoads B. L., Constantinescu G. S. Turbulent flow structure at a discordant river confluence: Asymmetric jet dynamics with implications for channel morphology. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, no. 122, pp. 1278-1293. DOI: 10.1002/2016JF004126.

36. Boyer C., Roy A. G., Best J. L. Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology. *Journal of Geophysical research*, 2006, no. 111, F04007. DOI: 10.1029/2005JF000458.
37. Ginevskii A. S. *Teoriia turbulentnykh strui i sledov. Integral'nye metody rascheta* [Theory of turbulent streams and traces. Integral methods of calculating]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 400 p.
38. Ismail H., Viparelli E., Imran J. Confluence of density currents over an erodible bed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, no. 121, pp. 1251-1272. DOI: 10.1002/2015JF003768.
39. Znamenskaia N. S. *Gidravlichesкое моделирование условий протессов* [Hydraulic modelling riverbed processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1992. 240 p.
40. Rhoads B. L., Sukhodolov A. N. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities. *Water Resources Research*, 2001, no. 37 (9), pp. 2393-2410. DOI: 10.1029/2001WR000316.
41. Bever A. J., MacWilliams M. L. Factors influencing the calculation of periodic secondary circulation in a tidal river: numerical modelling of the lower Sacramento River, USA. *Hydrological Processes*, 2016, no. 30, pp. 995-1016. DOI: 10.1002/hyp.10690.
42. Zinger J. A., Rhoads B. L., Best J. L., Johnson K. K. Flow structure and channel morphodynamics of meander bend chute cutoffs: A case study of the Wabash River, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, no. 118, pp. 2468-2487. DOI: 10.1002/jgrf.20155.
43. Lane S. N. Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology: a review of high-resolution approaches. *Hydrological Processes*, 1998, no. 12, pp. 1131-1150. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980630)12:8<1131::AID-HYP611>3.0.CO;2-K.
44. Bradbrook K. F., Biron P. M., Lane S. N., Richards K. S., Roy A. G. Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model. *Hydrological Processes*, 1998, no. 12, pp. 1371-1396. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980630)12:8<1371::AID-HYP620>3.0.CO;2-C.
45. Rhoads B. L., Kenworthy S. T. Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, no. 23, pp. 171-191. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199802)23:2<171::AID-ESP842>3.0.CO;2-T.

The article submitted to the editors 27.07.2018

### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Chemagin Andrei Aleksandrovich** – Russia, 626152, Tobolsk; Tobolsk Complex Scientific Station of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences; Candidate of Biology; Senior Researcher of the Group of Ecology of Aquatic Organisms; ChemaginAA@yandex.ru.

