

УДК 551.482.6

**Е.Д. Гопченко, д.г.н., А.И.Черой**

*Одесский государственный экологический университет*

*Дунайская гидрометеорологическая обсерватория*

## **ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И МУТНОСТИ ВОДЫ В РУКАВЕ БЫСТРЫЙ КИЛИЙСКОЙ ДЕЛЬТЫ ДУНАЯ**

*Дана характеристика временной изменчивости скорости течения и мутности воды в рукаве Быстрый Килийской дельты Дуная. Впервые количественно оценены величины кратковременного перераспределения стока, вызванного действием сгонов и нагонов. Разработаны рекомендации относительно улучшения получаемой гидрологической информации.*

**Ключевые слова:** *скорость течения, мутность воды, перераспределение стока, сгонно-нагонные явления, дельта Дуная.*

**Вступление.** Рукав Быстрый – это один из крупнейших водотоков дельты Дуная, в современных условиях при средней водности реки по нему проходит 17-18% стока Дуная в вершине дельты. В связи с проблемой заносимости судового хода «Дунай – Черное море» Дунайская ГМО в 2006 г., провела детальные исследования временной изменчивости мутности и скорости потока. Исследование проведено для более точной оценки стока воды и взвешенных наносов, ошибок измерений жидкого и твердого стока, а также для определения величин кратковременных перераспределений стока вследствие действия ветра.

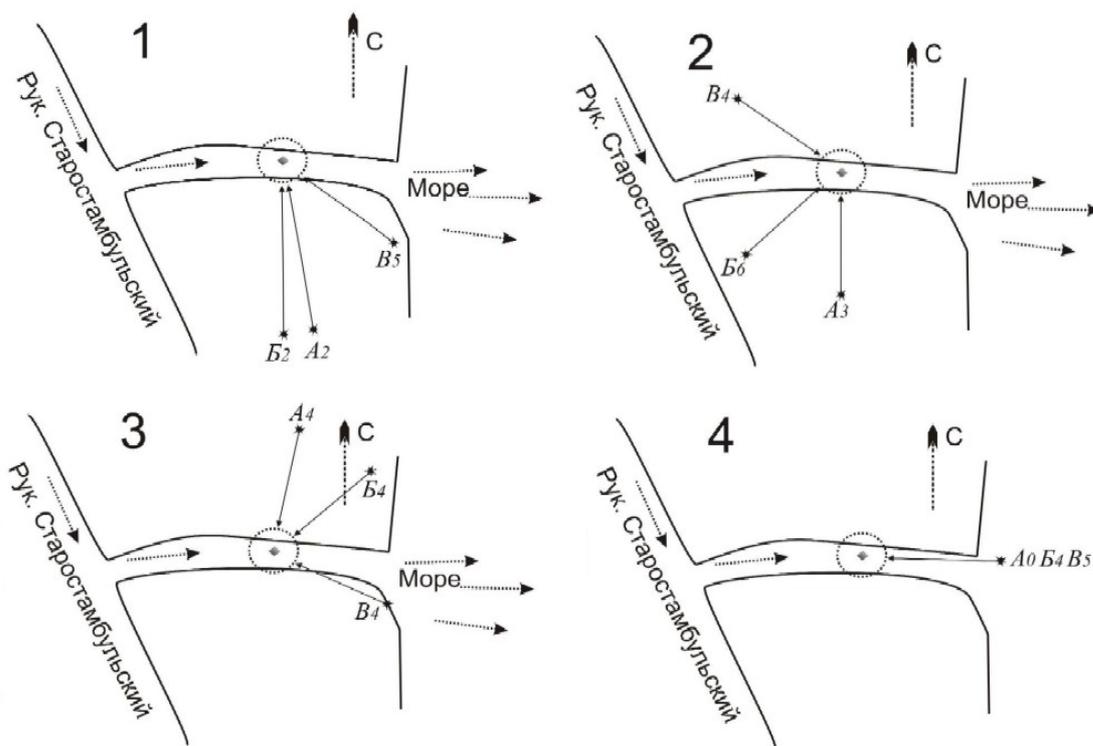
**Материалы и методы исследований.** С этой целью в 2006 г. в средней части рукава Быстрый (5 км) на стрежневой вертикали гидроствора в течение 5 часов (с 8<sup>00</sup> до 13<sup>00</sup>) с дискретностью 1 раз в 10 минут производились измерения скорости течения и отбор проб воды на мутность. Способ отбора проб и измерения скоростей - одноточечный (0,6h). Одновременно на постах Вилково и Быстрый (с учетом времени руслового добега) ежечасно отбирались пробы на определение единичной мутности. Измерения проведены в разные фазы гидрологического режима. Полученная информация обработана графически и аналитически, рассчитаны статистические характеристики временных рядов.

**Результаты исследований и их анализ.** Скорости течения во все фазы водности характеризуются довольно небольшой изменчивостью. Доверительные интервалы невелики, и отклоняются от среднего значения на величину, как правило, не более  $\pm 1\%$ . Выполнена проверка однородности рядов (табл.1). При помощи критериев Стьюдента, Фишера и Вилкоксона установлено, что ряды скорости, полученные в первых трех сериях измерений неоднородны. А с помощью критерия Аббе выявлено существование трендов в них. Ниже детально описаны причины, вызвавшие нарушения однородности скорости. Как известно, на гидрологический режим в устье Дуная (при отсутствии ледовых явлений) наибольшее воздействие оказывают водность реки, а так же сгоны и нагоны. Во время проведения первой серии измерений (18 апреля 2006 г.) в дельте Дуная наблюдалось увеличение водности. В вершине устьевой области уровни увеличивались в среднем по 7 см/сутки. Этот подъём уровня при данной фазе водности дает ежесуточное приращение расхода воды в вершине дельты Дуная, равное 500 м<sup>3</sup>/с. Следовательно, за 5 часов расход увеличивался на 104 м<sup>3</sup>/с. В условиях половодья рукав Быстрый перехватывает около 18% стока в вершине дельты. Так, за 5 часов, вследствие возрастания водности реки, сток Быстрого возрос приблизительно с 2500 до

2520 м<sup>3</sup>/с или на 0,8%. Величина возрастания расхода воды незначительна и, по всей видимости, не может быть отслежена с помощью непосредственных измерений скоростей гидрометрической вертушкой. На изменение скорости течения в большей степени повлиял ветер и его характеристики. В начале измерений наблюдался ветер южного направления, затем к 11.00 он начал усиливаться и разворачиваться на юго-восточный (рис.1).

Таблица 1 - Статистические параметры и проверка однородности в рядах скорости течения

Номер серии	Количество значений в ряду.	Среднее арифметическое	Дисперсия	Однородность 5 – ти часового ряда.	Уравнение линейного тренда
1	26	2,10	0,042	Неоднороден	$V_t=0,0034t+2,03$
2	29	1,90	0,064	Неоднороден	$V_t=0,0039t+1,84$
3	31	1,07	0,034	Неоднороден	$V_t=-0,0023t+1,11$
4	31	0,95	0,031	Однороден	
5	27	0,69	0,027	Однороден	



1- 18.04.2006 г., 2- 25.05.2006 г., 3- 22.07.2006 г., 4- 20.08.2006 г.  $A_i, B_i, V_i$  – скорость и направление ветра по МГС Усть – Дунайск в 6.00., 9.00 и 12.00 часов, соответственно.

Рис. 1 – Изменение ветрового режима за время измерений.

Действие ветра против течения в Старостамбульском рукаве создало дополнительный подпор в этом водотоке. Старостамбульский рукав впадает в море на юго-восток и имеет обширный мелководный бар. Поэтому действие ветров, направленных с моря, за короткое время создает существенный подпор в устье, который распространяется вверх

по рукаву. Смежный с ним рукав Быстрый течет с запада на восток и имеет глубокий бар, поэтому действие южных и юго-восточных ветров здесь намного слабее. Обладая меньшим сопротивлением, рукав Быстрый в этих условиях увеличивает сток. По уравнению линейного тренда (табл. 1) установлено, что на начало работ скорость в точке измерений равнялась 2,03 м/с, а на конец измерений - 2,13 м/с, т.е. увеличилась на 4,9%. Если принять это увеличение для расхода воды, то получим его изменение с 2500 до 2620 м<sup>3</sup>/с. Таким образом, величина «ветрового» приращения составила 104 м<sup>3</sup>/с, что почти в 6 раз превышает «режимное» приращение расхода воды.

Вторая серия измерений была проведена 25 мая 2006 г. во время спада половодья. Падение уровня в вершине устьевой области в это время составляло около 6 см/сутки. Подобным образом, оценив величину режимной составляющей, получим уменьшение расхода в рукаве Быстрый за 5 часов, равное 7,5 м<sup>3</sup>/с. С начала измерений 25 мая дул юго-восточный ветер. Затем, сохраняя скорость, он развернулся на западный, а с 10.30 - на северо-западный. Скорость течения возросла за время проведения работ с 1,84 м/с до 1,96 м/с, т.е. на 6,5%. Принимая изменение расхода воды пропорциональным возрастанию скорости, получим увеличение расхода с 2300 до 2450 м<sup>3</sup>/с. Ветер обусловил изменение равное, 140 м<sup>3</sup>/с, что почти в 19 раз больше режимного уменьшения расхода.

Во время проведения 3-й серии измерений в устьевой области Дуная наблюдался интенсивный спад уровней, равный 15 см/сутки. Это падение уровня дает понижение водности рукава Быстрый за 5 часов при данной фазе водности на 13 м<sup>3</sup>/с. В начале работ наблюдался северо-северо-восточный ветер. Скорость его равная 4 м/с, сохранилась на протяжении всей работы. К 11. 00 ветер стал восточным, а к концу наблюдений - восточным-юго-восточным. Скорость течения сократилась за время проведения наблюдений с 1,11 до 1,04 м/с, т.е. на 6,3 % и таким образом, расход рукава уменьшился с 1200 до 1120 м<sup>3</sup>/с.

В двух рядах скоростей течения, полученных во время измерений четвертой и пятой серий, статистический анализ не выявил направленных изменений величин. Это было связано с устойчивым действием ветров. За время проведения исследований практически не изменилась ни скорость ветра, ни его направление. Так, 20 августа к началу измерений (8 ч.) уже отмечался восточный ветер со скоростью около 3 м/с. К концу наблюдений (13 ч.) он немного усилился - до 5 м/с. Усиление восточных ветров, как правило, вызывает нагонные явления и создает подпор, что должно было сказаться на скорости. Но в это время в устье Дуная наблюдался рост водности, что по-видимому, несколько компенсировало уменьшение скоростей. Во время пятой серии (8 октября) отмечался северо-восточный и северо-северо-восточный ветер со скоростью 5 м/с. Ветер в основном сохранял это же направление и скорость с 6-го октября. Поэтому измерения были проведены в условиях «развившегося нагона», и скорости течения за 5 часов наблюдений оставались стабильными.

Естественно, что во время действия ветров помимо изменения скорости течения происходит изменение и уровня воды в рукаве, а, как следствие, изменение площади поперечного сечения. Так, при сгоне имеет место увеличение скоростей, но в то же время сокращение площади поперечного сечения, при нагонах наблюдается обратная картина. Проиллюстрируем, к каким изменениям уровня приводили бы сгоны и нагоны без изменения расхода воды в рукаве Быстрый.

Так, во время спада половодья 25 мая на начало измерений гидроствор Быстрый (5 км) имел следующие характеристики:  $F_8=1550 \text{ м}^2$ ,  $B_8=185 \text{ м}$ ,  $h_8=8,38 \text{ м}$ ,  $V_8=1,84 \text{ м/с}$ , где  $F_8$  – площадь поперечного сечения в 8 часов,  $B_8$  – ширина потока в 8 часов,  $h_8$  – средняя глубина потока в 8 часов,  $V_8$  – скорость течения в 8 часов на стрежневой

вертикали в точке  $0,6h$  (приниматься равной средней скорости всего потока). Исходя из общеизвестных соотношений, связывающих эти величины, запишем тождество

$$h_8 B_8 V_8 = h_{13} B_{13} V_{13}. \quad (1)$$

Рукав Быстрый на 5 км имеет довольно обрывистые склоны русла и при выходе воды на пойму водный сток по ней очень мал. В течение года ширина живого сечения потока изменяется очень незначительно. Поэтому можно принять равенство ширины русла на 8.00 и на 13.00. К 13 часам скорость стала равной 1,96 м/с. Таким образом, уравнение (1) примет вид

$$h_{13} = h_8 V_8 / V_{13}. \quad (2)$$

Подставляя известные нам величины, получаем среднюю глубины на 13 часов 25 мая, равную 7,87 м. Следовательно, если бы расход рукава за время этого сгона не изменился, то уровень должен был уменьшиться на 0,51 м. По нашим наблюдениям, падения уровня на 5 км рукава Быстрый за пять часов не превысило 5 см. Это дает основание сделать заключение о том, что во время образования и развития сгонов расход рукава изменяется значительно. Так, в данном примере, расход за 5 часов увеличился на 5-6%.

Во время начала нагона 22 июля 2006г. гидроствор имел следующие характеристики:  $F_8 = 1440 \text{ м}^2$ ,  $B_8 = 180 \text{ м}$ ,  $h_8 = 8,00 \text{ м}$ ,  $V_8 = 1,11 \text{ м/с}$ . Подобным образом находим, что на 13 часов уровень при неизменном расходе воды должен был увеличиться до 8,54 м. В натуральных же условиях за 5 часов на гидростворе Быстрый (5 км) он возрос всего на 8-10 см. Таким образом, в данном случае из-за образования и развития нагона водность рукава под воздействием ветра уменьшилась на 4-5 %.

Во всех вышеприведенных оценках изменения водности рукавов полагаем, что точка измерения скорости репрезентативна для всего потока. В натуральных условиях ветер наиболее активно воздействует на поверхностные слои потока. Поэтому при развитии сгонов или нагонов в рукаве Быстрый скорость изменяться в поверхностных слоях более активно, чем в точке  $0,6h$  (это подтверждается и нашими изысканиями). В глубинных слоях эти изменения, видимо, меньше. Правильность таких выводов подтверждается также наличием тесной связи между скоростью в данной точке и средней скоростью всего потока.

Анализ временных рядов мутности, полученных во время тех же 5-ти серий измерений, позволил установить следующее. Ряды мутности дунайской воды имеют относительно большую временную изменчивость, по сравнению с рядами скорости течения. Границы доверительного интервала отклоняются на 5-17% от среднего. Значительна и амплитуда колебаний мутности в течении 5-ти часов. Максимальные величины ряда больше минимальных в 4-6 раз во время половодья и в 1,5-3 раза - в условиях среднего стока и межени. При этом нужно учесть, что пробы для определения мутности отбираются батометром-бутылкой в грузе, который заполняется в течение 40-60 сек., тем самым, усредняя мутность в пределах этого интервала времени. Изменчивость мгновенных значений мутности в данной точки, видимо, намного выше. Рассчитанные статистики критериев Стьюдента, Фишера и Вилкоксона не указывают на нарушения однородности. Надежной корреляционной связи между временными рядами мутности и скорости потока не выявлено. В табл.2. приводятся сведения о повторяемости и обеспеченностях величин мутности при каждой серии измерений.

Таблица 2 - Распределение величин мутностей проб по фиксированным (для всех серий) диапазонам обеспеченности

Диапазоны обеспеченностей мутности, %	Диапазоны мутности, г/м <sup>3</sup>	Доля от общего количества проб, попавших в диапазон, %	Диапазоны мутности, г/м <sup>3</sup>	Доля от общего количества проб, попавших в диапазон, %	Диапазоны мутности, г/м <sup>3</sup>	Доля от общего количества проб, попавших в диапазон, %	Диапазоны мутности, г/м <sup>3</sup>	Доля от общего количества проб, попавших в диапазон, %	Диапазоны мутности, г/м <sup>3</sup>	Доля от общего количества проб, попавших в диапазон (%)
№ серии	1		2		3		4		5	
0-3	Более 1140		Более 760		Более 230		Более 290		Более 150	
3-5	[1140-950)	3,7	[760-740)	3,3	[230-230)	0	[290-270)	3,1	[150-130)	3,6
5-10	[950-720)	3,7	[740-510)	3,3	[230-220)	6,3	[270-240)	3,1	[130-110)	3,6
10-20	[720-680)	11,1	[510-430)	10,0	[220-220)	9,4	[240-230)	6,3	[110-93)	10,7
20-30	[680-650)	7,4	[430-330)	10,0	[220-210)	6,3	[230-220)	15,6	[93-90)	10,7
30-40	[650-610)	11,1	[330-300)	10,0	[210-200)	15,6	[220-210)	9,4	[90-85)	7,1
40-50	[610-580)	11,1	[300-250)	6,7	[200-200)	9,4	[210-200)	9,4	[85-82)	10,7
50-60	[580-550)	7,4	[250-200)	10,0	[200-200)	12,5	[200-200)	12,5	[82-75)	10,7
60-70	[550-510)	11,1	[200-190)	10,0	[200-180)	6,3	[200-190)	6,3	[75-64)	10,7
70-80	[510-430)	11,1	[190-180)	6,70	[180-160)	12,5	[190-180)	12,5	[64-60)	7,1
80-90	[430-410)	7,4	[180-170)	13,3	[160-160)	9,4	[180-180)	9,4	[60-52)	10,7
90-95	[410-280)	7,4	[170-140)	10,0	[160-150)	6,3	[180-170)	6,3	[52-47)	3,6
95-97	[280-260)	3,7	[140-120)	3,3	[150-150)	3,1	[170-160)	3,1	[47-47)	7,1
97-100	[260 и менее		[120 и менее		[150 и менее		[160 и менее		[47 и менее	

Используя информацию о распределении величин мутности воды данного сценария прохождения твердого стока, легко оценить вероятность попадания единичной мутности в тот или иной интервал. Полученная информация может быть использована для оценки качества наблюдений как за единичными мутностями на постах, так и за мутностями воды при измерениях расходов взвешенных наносов. Так, например, 18 апреля 2006 г. при отборе пробы наблюдатель имел одинаковую вероятность, равную около 11%, отобрать пробу с мутностью попавшей в диапазоны [720-680 г/м<sup>3</sup>), [650-610 г/м<sup>3</sup>), [610-580 г/м<sup>3</sup>), [550-510 г/м<sup>3</sup>), [510-430 г/м<sup>3</sup>). Вероятность - равную 3%, отобрать пробу с мутностью более 1140 г/м<sup>3</sup> и эту же вероятность с мутностью менее 260 г/м<sup>3</sup>. Вероятность того, что наблюдатель отобрал бы пробу с мутностью, попавшей в диапазон 680-430 г/м<sup>3</sup>, составляет всего 59%. Большая изменчивость мутности на постах Вилково и Быстрое была подтверждена данными, полученными при ежечасном отборе проб во время проведения исследования.

В условиях среднего стока 22 июля и 20 августа 2006 г. амплитуда временных колебаний мутности заметно меньше. В условиях средней водности реки наблюдатель, отобрав единичную пробу воды на мутность, имеет на много большую вероятность того, что её значение будет близким к средней мутности за 5 часов.

**Выводы.** 1. Стандартные гидрометрические вертушки типа ГР-21 пригодны для наблюдений за кратковременным перераспределением стока воды по рукавам дельты Дуная.

2. Изменения расходов воды рукава Быстрый, даже при образовании и развитии слабых и умеренных сгонно-нагонных явлений, значительны и часто превышают погрешность измерений самих расходов воды.

3. За короткие промежутки времени действие ветров оказывает намного большее воздействие на скоростной режим потока и жидкий сток, нежели изменение водности реки.

4. При возникновении и развитии слабых и умеренных ветров, а так же при изменении направления ветра расход рукава Быстрый за несколько часов может измениться на 2-6%. Ветры Ю, ЮЗ, З и СЗ направлений увеличивают сток рукава, а СВ, В, ЮВ и, видимо, С - уменьшают его. По мнению авторов, при возникновении и развитии сильного ветра расход рукава Быстрый за несколько часов может измениться на величину до  $\pm 10\%$  от начального.

5. При сохранении силы и направления ветра во время измерений, однородность в рядах скорости потока сохраняется, т.е. значимого изменения её не происходит.

6. Между изменениями параметров ветра и изменениями скоростного поля потока в рукаве Быстрый существует тесная взаимосвязь.

7. Колебания значений мутности проб воды, отобранных батометром-бутылкой в грузе за короткие промежутки времени (5 часов), очень велики. Особенно велика амплитуда колебаний во время высоких половодий. Однако, данные колебания не имеют направленных тенденций. Поэтому при определении средней мутности данного режима прохождения твердого стока важно количество отобранных проб на определение мутности, а не распределение (растягивание) отборов проб на большой интервал времени. Так, в условиях половодья в точке измерения мутности достаточно последовательно отобрать 10-15 проб, а в условиях среднего стока и межени - 5-10. Среднее значение мутности этих проб с большой степенью надежности можно принять как среднее значение мутности данной фазы гидрологического режима реки, а также как среднесуточное значение при условии отсутствия резких скачков мутности.

8. При измерении расхода взвешенных наносов в условиях половодья количество отбираемых проб должно быть увеличено на гидростворах дельты минимум вдвое (для

рукава Быстрый с 8 до 16). При измерениях мутности в условиях среднего стока и межени увеличивать количество отбираемых проб нецелесообразно.

9. Принимать единичную мутность, отобранную в 8 часов на постах, как единичную среднесуточную, особенно в условиях половодья, не совсем верно. На гидрологических постах, находящихся в пределах устьевой области необходимо увеличить количество отбираемых проб для определения мутности с 1 до 10-15 в условиях половодья и с 1 до 5-10 - для условий межени. Причем, пробы воды могут быть отобраны не в течение суток, а последовательно за один прием.

10. Исследования, проведенные в различные фазы гидрологического режима реки, не выявили связей между мутностью воды и скоростью течения. Также не выявлена взаимосвязь между мутностью воды и элементами ветрового режима.

**Часова мінливість швидкості течії і мутності води в гирлі Бистре Кілійської дельти Дунаю. Гопченко Є.Д., Черой О. І.**

*Надана характеристика часової мінливості швидкості течії й мутності води в гирлі Бистре Кілійської дельти Дунаю. Уперше кількісно оцінені величини короткочасного перерозподілу стоку, викликаного дією згонів і нагонів. Запропоновані рекомендації щодо підвищення якості гідрологічної інформації.*

**Ключові слова:** швидкість течії, мутність води, перерозподіл стоку, явища згонів і нагонів, дельта Дунаю.

**The temporal variability of current velocity and turbidity in the Bystry branch of Chilia delta of Danube. Gopchenko E., Cheroy A.**

*The characteristics of temporal variability of current velocity and turbidity in Bystry branch has given. The quantitative estimation of short-term water runoff redistribution caused by wind denivellements has given for the first time. Recommendations concerning improvement of the received hydrological information has been developed.*

**Keywords:** flow velocity, turbidity, water runoff redistribution, wind denivellements, Danube delta.