

у д. Сенин – 135 дней. В летний сезон Ясельда зарастает водной растительностью, что создает подпор уровня воды и нарушает в значительной степени прямую зависимость между уровнем и расходом воды. Влияние зарастания на сток начинает сказываться в мае и достигает максимума в августе.

Зимняя межень обычно устанавливается в конце ноября – начале декабря. По сравнению с летними уровни зимней межени, как правило, выше в среднем на 0,1 м. Подъем уровня, вызванный зимними паводками (в результате таяния снега во время оттепелей или выпадения осадков), по высоте в большинстве случаев ниже летних паводков. В табл. 2.7 приведены низшие уровни воды в межень за период инструментальных наблюдений.

Величина изменения хода уровня за многолетний период, характеризующаяся средними годовыми амплитудами, представлена на рис. 2.3.

2.4. Режим стока

Одной из основных характеристик гидрологического режима рек является средняя многолетняя величина, или норма стока. *Нормой годового стока* называется его среднее значение за многолетний период при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки. Такой уровень включает несколько (не менее двух) четных замкнутых циклов колебаний водности.

При наличии данных гидрометрических наблюдений норма годового стока определяется по формуле

$$\bar{Q} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (2.4)$$

где \bar{Q} – норма годового стока, м³/с; Q_i – годовые значения стока за длительный период (n , лет), при котором дальнейшее увеличение ряда наблюдений не меняет или мало меняет среднюю арифметическую величину \bar{Q} .

Из-за недостаточной длины фактических рядов наблюдений за годовым стоком среднее значение, полученное по формуле (2.4), отличается от нормы стока, т. е. рассчитывается с некоторой относительной средней квадратической ошибкой:

$$\delta_{\bar{Q}} = \frac{C_V}{\sqrt{n}} \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

где C_V – коэффициент изменчивости (вариации) ряда годовых величин стока за n лет, можно определить методом моментов по формуле

$$C_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (2.6)$$

где K_i – модульный коэффициент, определяемый по формуле

$$K_i = Q_i / \bar{Q}. \quad (2.7)$$

Продолжительность периода наблюдений следует считать достаточной, если относительная среднеквадратичная погрешность расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10,0 % – для годового и сезонного стоков и 20,0 % – для максимального и минимального стоков [133]. При невыполнении этих условий расчетный ряд считается недостаточным, и его необходимо привести к многолетнему периоду с привлечением реки-аналога.

Коэффициент вариации (изменчивости) (C_v) – безразмерный статистический параметр, характеризующий изменчивость гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

Коэффициент асимметрии (C_s) – безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности распределения ряда рассматриваемой гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения и который можно определить методом моментов по формуле

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{C_v^3 (n-1)(n-2)}. \quad (2.8)$$

При водохозяйственном использовании реки необходимо знать не только среднюю величину (норму стока), но и сток различной вероятности превышения (обеспеченности).

Коэффициент автокорреляции $r(\tau)$ – характеризует связь ряда гидрологических величин с этим же рядом, сдвинутым на некоторый интервал времени τ . Коэффициент автокорреляции позволяет судить о случайности и независимости значений характеристики ряда. Значения $r(\tau) \leq 0,2$ считаются несущественными.

Для определения стока различной вероятности превышения используются аналитические функции распределения ежегодных вероятностей превышения – кривые обеспеченности (трехпараметрические распределения Крицкого–Менкеля, распределение Пирсона III типа (биномиальная кривая)). Эмпирическая ежегодная вероятность превышения гидрологической характеристики вычисляется по формуле

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100 \%, \quad (2.9)$$

где m – порядковый номер членов ряда соответствующей гидрологической характеристики, расположенной в убывающем порядке; n – общее число членов ряда.

Анализ гидрометеорологической информации. Для получения достоверных данных наблюдений за водным режимом средних значений стока за многолетний период и расчетных обеспеченных значений вся гидрометеорологическая информация должна подвергаться тщательному анализу, так как статистически обрабатываемые ряды должны быть генетически однородны.

Оценка однородности выборочных средних выполняется по t -критерию Стьюдента, который рассчитывается по формуле

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \hat{\sigma}_x^2 + n_y \hat{\sigma}_y^2}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (2.10)$$

где \bar{x} и \bar{y} – выборочные средние; $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ – выборочные дисперсии; n_x и n_y – объемы выборок.

Оценка однородности выборочных средних из асимметрично распределенных совокупностей выполняется аналогичным образом при тех же значениях t_α . Полученное значение t -критерия Стьюдента сравнивается с его критическим значением при заданном уровне значимости $\alpha \leq 5,0$ %. Если $t < t_\alpha$, принимается гипотеза однородности двух выборочных средних.

Критерий однородности Фишера F служит для оценки однородности средних квадратических отклонений двух выборок (или двух частей одной выборки). Гипотеза однородности выборочных дисперсий отвергается, если имеет место неравенство $F > F_\alpha$, где F_α – критическое значение критерия однородности Фишера, или принимается, если знак неравенства меняется на противоположный, т. е. $F \leq F_\alpha$. В последнем случае считается, что данные наблюдений не противоречат выдвигаемой гипотезе. Критерий однородности Фишера рассчитывается по формуле

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2.11)$$

где $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ – выборочные дисперсии; в числителе берется большая из дисперсий.

Оценка однородности (стационарности) рядов гидрологических наблюдений осуществляется на основе генетического анализа условий формирования речного стока путем выявления причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений. Проследить изменения физико-географических характеристик водосборов под влиянием всего комплекса мероприятий, проводимых на водосборе, практически невозможно. Наиболее существенное влияние на сток рек бассейна Ясельды оказали гидротехнические мелиорации, строительство прудов и водохранилищ; самым крупным является вдхр. Селец, введенное в эксплуатацию в 1986 г. Таким образом, наиболее вероятным переломом в формировании водного режима рек бассейна Ясельды является 1986 г. (ввод в эксплуатацию вдхр. Селец, проведение основных мелиоративных работ; кроме того, на это время приходится начало современного потепления климата). В связи с этим имеющуюся гидрологическую информацию разбили на два периода: с 1945 г. (или начала наблюдений) до 1985 г. и с 1986 г. по настоящее время. Далее был произведен расчет всех параметров для нахождения критериев Фишера и Стьюдента для каждого исходного ряда речного стока.

В табл. 2.8 приведены значения критерия Стьюдента и Фишера, рассчитанные для рассматриваемых периодов, а также их критические значения. Ее анализ показывает, что ряды наблюдений, как правило, неоднородны. Исключе-

Таблица 2.8. Параметры гидрологических рядов выделенных периодов и значения статистических критериев

Река – створ	Период, гг.	Среднее значение, м ³ /с	Дисперсия	Критерий		Подтверждение гипотезы однородности	
				$t/t_{кр}$	$F/F_{кр}$	по t	по F
<i>Среднегодовые расходы воды</i>							
р. Ясельда – г. Береза	1945–1985	4,53	2,7	<u>0,95</u>	<u>2,38</u>	Да	Нет
	1986–2013	4,84	1,2	2,00	1,84		
р. Ясельда – д. Сенин	1945–1985	19,4	63,5	<u>0,11</u>	<u>2,85</u>	Да	Нет
	1986–2014	19,5	22,3	2,00	1,82		
кан. Винец – д. Рыгали	1962–1985	0,548	0,265	<u>2,37</u>	<u>1,45</u>	Нет	Да
	1986–2013	0,861	0,182	2,01	1,94		
р. Меречанка – д. Красиево	1971–1985	0,644	0,03	<u>2,21</u>	<u>1,55</u>	Нет	Да
	1986–2014	0,533	0,02	2,06	2,06		
<i>Максимальные расходы воды половодья</i>							
р. Ясельда – г. Береза	1945–1985	31,9	542,9	<u>5,67</u>	<u>44,3</u>	Нет	Нет
	1986–2013	11,0	12,2	2,02	1,84		
р. Ясельда – д. Сенин	1945–1985	92,1	8470,4	<u>3,06</u>	<u>32,7</u>	Нет	Нет
	1986–2014	47,2	253,2	2,01	1,82		
кан. Винец – д. Рыгали	1962–1985	10,1	42,8	<u>4,05</u>	<u>5,03</u>	Нет	Нет
	1986–2013	4,24	8,52	2,04	1,96		
р. Меречанка – д. Красиево	1971–1985	11,5	34,5	<u>4,32</u>	<u>3,52</u>	Нет	Нет
	1986–2014	4,79	8,9	2,10	2,06		
<i>Максимальные расходы воды паводка</i>							
р. Ясельда – г. Береза	1945–1985	8,67	51,7	<u>1,16</u>	<u>5,84</u>	Да	Нет
	1986–2010	10,2	8,9	2,00	1,89		
р. Ясельда – д. Сенин	1945–1985	30,2	613,3	<u>1,19</u>	<u>5,59</u>	Да	Нет
	1986–2010	24,9	109,7	2,00	1,89		
кан. Винец – д. Рыгали	1962–1985	2,48	4,3	<u>2,75</u>	<u>6,94</u>	Нет	Нет
	1986–2010	1,25	0,6	2,05	1,99		
р. Меречанка – д. Красиево	1970–1985	2,96	7,76	<u>1,30</u>	<u>2,62</u>	Да	Нет
	1986–2004	1,92	2,96	2,06	2,27		
<i>Минимальные летне-осенние расходы воды</i>							
р. Ясельда – г. Береза	1945–1985	0,882	0,54	<u>6,79</u>	<u>1,50</u>	Нет	Да
	1986–2013	2,27	0,81	2,01	1,77		
р. Ясельда – д. Сенин	1945–1985	4,81	7,3	<u>2,70</u>	<u>1,91</u>	Нет	Нет
	1986–2014	7,02	14,1	2,01	1,77		
кан. Винец – д. Рыгали	1962–1985	0,115	0,004	<u>1,70</u>	<u>1,63</u>	Да	Да
	1986–2012	0,150	0,007	2,01	1,99		
р. Меречанка – д. Красиево	1970–1985	0,144	0,004	<u>0,52</u>	<u>2,00</u>	Да	Да
	1986–2014	0,153	0,002	2,07	2,04		

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Окончание табл. 2.8

Река – створ	Период, гг.	Среднее значение, м ³ /с	Дисперсия	Критерий		Подтверждение гипотезы однородности	
				$t/t_{кр}$	$F/F_{кр}$	по t	по F
<i>Минимальные зимние расходы воды</i>							
р. Ясельда – г. Береза	1945–1985	1,59	1,97	<u>4,39</u>	<u>1,79</u>	Нет	Да
	1986–2013	2,89	1,10	2,00	1,83		
р. Ясельда – д. Сенин	1945–1985	8,23	109,3	<u>1,81</u>	<u>4,75</u>	Да	Нет
	1986–2014	11,6	23,0	2,00	1,82		
кан. Винец – д. Рыгали	1962–1985	0,185	0,03	<u>3,39</u>	<u>1,20</u>	Нет	Да
	1986–2012	0,44	0,34	2,01	1,96		
р. Меречанка – д. Красиево	1971–1985	0,183	0,009	<u>2,59</u>	<u>1,40</u>	Нет	Да
	1986–2014	0,267	0,013	2,03	2,32		

ние составляют минимальные летне-осенние расходы воды Меречанки в створе д. Красиево и кан. Винец в створе д. Рыгали. Однородные ряды расходов воды рек свидетельствуют о ненарушенном водном режиме или его неизменности в связи с компенсационными сглаживающими гидротехническими мероприятиями. Также возможна гипотеза о синхронности антропогенных воздействий и колебаниях водного режима, т. е. при одновременном увеличении водности рек и интенсивности осушительных мелиоративных мероприятий и одновременном спаде этих двух процессов водность реки практически не изменяется и ряд остается однородным.

Нарушенный режим рек, выраженный в устойчивости средних многолетних значений (гипотеза однородности принимается по критерию Стьюдента), с изменениями в характере колебаний расходов (отвергается гипотеза по критерию Фишера) наблюдается для среднего годового стока для Ясельды в створах г. Березы и д. Сенин; для максимальных расходов воды паводка – для р. Ясельды в створах г. Березы и д. Сенин и р. Меречанки в створе д. Красиево; для минимальных зимних расходов воды – для р. Ясельды в створе д. Сенин. Нарушенный режим рек, выраженный в изменении среднего многолетнего значения (гипотеза однородности отвергается по критерию Стьюдента) без изменений структуры в колебаниях расходов воды (гипотеза однородности принимается по критерию Фишера) наблюдается для среднего годового стока для р. Меречанки в створе д. Красиево и кан. Винец в створе д. Рыгали; для минимальных летне-осенних расходов воды – для р. Ясельды в створах г. Березы; для минимальных зимних расходов воды – для р. Ясельды в створе г. Березы, р. Меречанки в створе д. Красиево и кан. Винец в створе д. Рыгали. Нарушенный режим по обоим рассматриваемым критериям для максимальных расходов воды паводка для всех рассматриваемых рек; для максимальных расходов воды паводка для кан. Винец в створе д. Рыгали; для минимальных летне-осенних расходов воды для р. Ясельды в створе д. Сенин.

Причинами, вызвавшими неоднородность в гидрологических рядах, могут быть естественные колебания водности или антропогенные воздействия на водный режим рек.

Надежные данные по стоку за репрезентативный период формируют статистический ряд, у которого среднее значение и коэффициенты вариации и асимметрии являются параметрами кривой обеспеченности. С помощью этих параметров можно определить расчетное (обеспеченное) значение гидрологической характеристики. Для рек, в бассейнах которых имеет место интенсивная хозяйственная деятельность, существенно нарушающая естественный гидрологический режим рек, определение расчетных гидрологических параметров производят по двум расчетным схемам. Первая расчетная схема предполагает приведение гидрологических рядов наблюдений к естественным однородным стационарным условиям воднобалансовыми и регрессионными методами. В расчетное значение гидрологического параметра, полученного по естественному ряду, вводят поправку на влияние хозяйственной деятельности. Значение поправки расчетной вероятности превышения определяют по кривой распределения поправок. Во второй расчетной схеме гидрологические ряды наблюдений приводят к бытовому стоку за весь период наблюдений в предположении, что сложившийся комплекс хозяйственной деятельности с учетом реальных планов развития экономики действовал с начала наблюдений. Восстановление бытового стока за весь период наблюдений производят воднобалансовыми и регрессионными методами. Восстановленный ряд проверяют на однородность с использованием генетических и статистических методов. Определение расчетных гидрологических параметров в этом случае производят по данным за весь период наблюдений без введения поправок на хозяйственную деятельность.

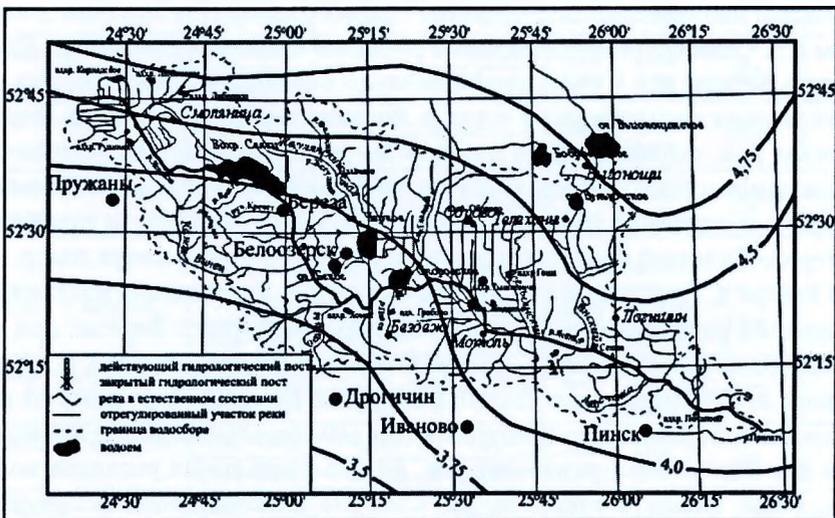


Рис. 2.4. Карта среднееголетнего годового стока рек бассейна Ясельды, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2\cdot 10^{-3}$

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Среднегодовой сток. На рис. 2.4 приведена карта среднегодового стока рек бассейна Ясельды. Уменьшение годовой величины стока наблюдается в направлении с севера на юг и обусловлено уменьшением объемов весеннего половодья и увеличением испарения в теплый период года, а также соотносится с распределением годовых осадков. Некоторое различие представленной карты стока рек бассейна Ясельды от карт стока рек Беларуси, опубликованных в работах [91, 119, 153, 161, 225, 226], обусловлено масштабом карт и учетом а зональных факторов.

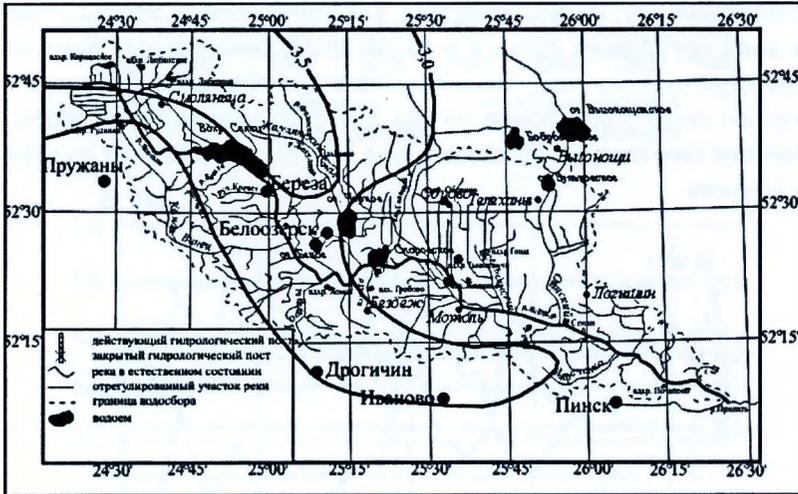


Рис. 2.5. Карта среднегодового поверхностного годового стока рек бассейна Ясельды, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2\cdot 10^{-3}$

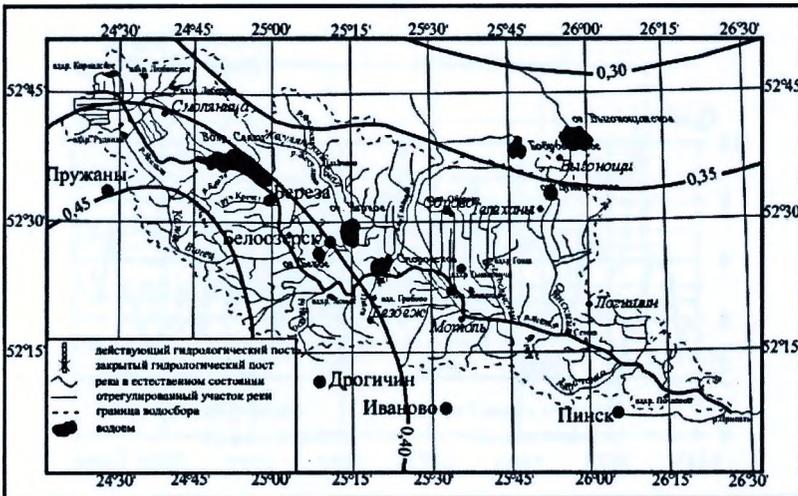
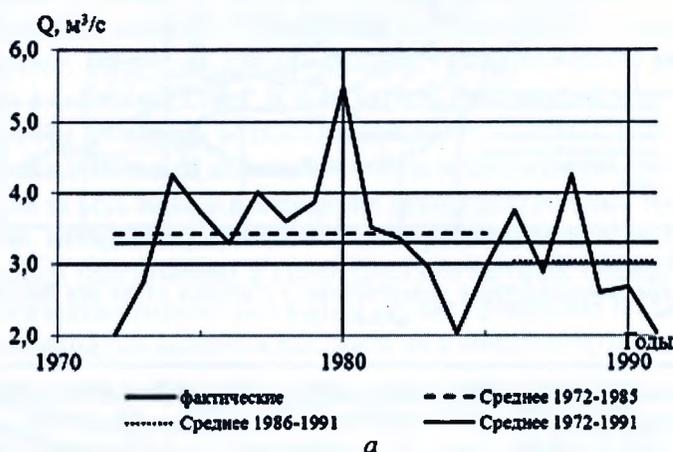


Рис. 2.6. Карта коэффициентов вариации среднегодового стока рек бассейна Ясельды

Наибольшая величина стока наблюдается на севере бассейна и достигает $5,2 \text{ л/(с·км}^2\text{)}$, минимальные модули стока отмечаются на юге бассейна и составляют $3,7 \text{ л/(с·км}^2\text{)}$. Средние многолетние значения годового поверхностного стока бассейна Ясельды колеблются от $3,5 \text{ л/(с·км}^2\text{)}$ в северной части бассейна до $2,8 \text{ л/(с·км}^2\text{)}$ в южной его части. Так же, как и общий сток, поверхностный сток данного региона – наименьший для республики (рис. 2.5). Сток рек рассматриваемого района имеет небольшую изменчивость – коэффициенты вариации колеблются в пределах $0,28\text{--}0,32$ (рис. 2.6).

Относительно других рек Беларуси, для рек бассейна Ясельды характерна большая доля грунтового стока и в то же время наименьшая доля весеннего стока. Это обусловлено тем, что в бассейне преобладают песчаные и супесчаные хорошо водопроницаемые почвы, которые способствуют значительной инфильтрации снеговых и дождевых вод, их аккумуляции и отдачи в реки в период межени.



2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

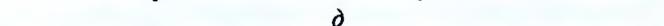
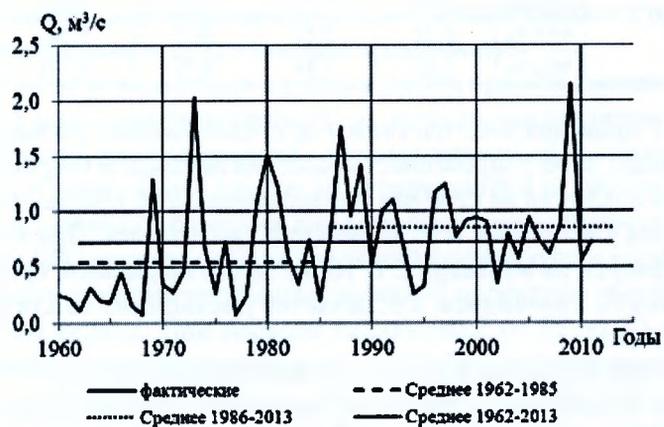
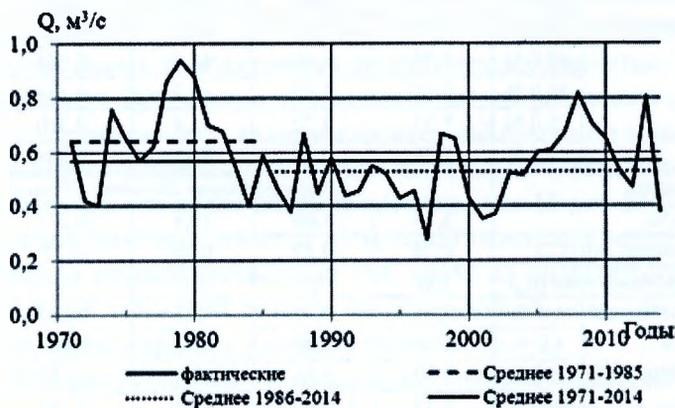
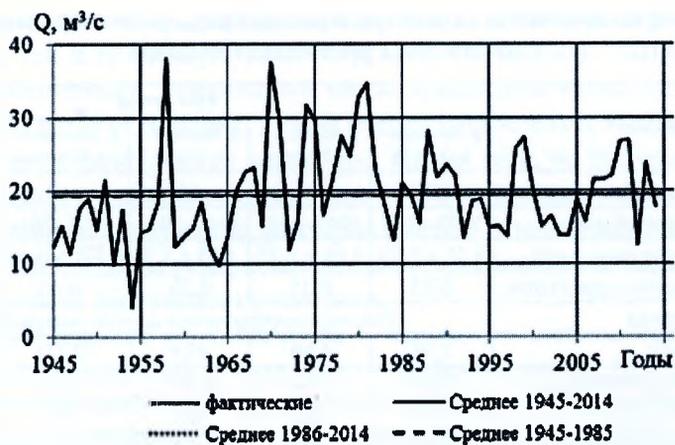


Рис. 2.7. Многолетний ход среднегодовых расходов воды рек: а – р. Ясельда – д. Хорева; б – р. Ясельда – г. Береза; в – р. Ясельда – д. Сенин; г – р. Мерчанка – д. Красиево; д – кан. Винец – д. Рыгали

Таблица 2.9. Статистические параметры и расходы воды расчетной обеспеченности годового стока рек бассейна Ясельды

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Меречанка – д. Красиево	кан. Винец – д. Рыгали	
Количество лет наблюдений	20	68	69	44	51	
Период наблюдений, годы	1972–1991	1945–2013	1945–2014	1971–2014	1962–2013	
Среднее значение стока, м ³ /с	3,31 ± 0,25	4,66 ± 0,25	19,3 ± 1,2	0,571 ± 0,040	0,736 ± 0,030	
Коэффициент автокорреляции	0,25	0,35	0,26	0,40	0,05	
Вид распределения	<i>Трехпараметрическое гамма-распределение</i>					
Норма стока, м ³ /с	3,36	4,66	19,4	0,571	0,749	
Коэффициент вариации (C_v)	0,28	0,32	0,36	0,28	0,32	
Соотношение (C_s/C_v)	4,5	3,0	3,0	3,0	6,0	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	1,0 %	5,62	8,91	37,1	1,160	1,590
	5,0 %	4,74	7,25	30,2	0,925	1,200
	25,0 %	3,76	5,45	22,7	0,678	0,853
	50,0 %	3,25	4,46	18,6	0,543	0,698
	75,0 %	2,83	3,65	15,2	0,434	0,587
	95,0 %	2,35	2,72	11,4	0,310	0,468
99,0 %	2,09	2,23	9,33	0,248	0,408	
Вид распределения	<i>Распределение Пирсона III типа</i>					
Норма стока, м ³ /с	3,36	4,66	19,4	0,571	0,749	
Коэффициент вариации (C_v)	0,28	0,32	0,36	0,29	0,32	
Коэффициент асимметрии (C_s)	0,6	1,9	1,0	0,6	2,2	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	1,0 %	5,89	8,72	40,5	1,010	1,630
	5,0 %	5,02	7,32	32,5	0,856	1,240
	25,0 %	3,92	5,56	23,2	0,668	0,834
	50,0 %	3,27	4,51	18,3	0,555	0,670
	75,0 %	2,70	3,59	14,3	0,457	0,583
	95,0 %	2,02	2,51	10,2	0,341	0,537
99,0 %	1,63	1,88	8,32	0,272	0,532	

На рис. 2.7 приведен многолетний ход среднегодовых расходов воды рек бассейна Ясельды. Зарегулированность бассейна Ясельды и современное потепление климата повлияли на сток рек неоднозначно. Так, среднегодовой расход воды кан. Винец увеличился, а р. Меречанки уменьшился. При этом характер колебаний водности не изменился. В то же время на Ясельде средние многолетние значения не изменились, а отмечается уменьшение амплитуды колебания годового стока.

В табл. 2.9 приведены основные гидрологические характеристики годовых расходов воды Ясельды и ее притоков, даны также расходы воды расчетной обеспеченности, рассчитанные с использованием различных теоретических кривых распределения вероятностей.

Внутригодовое распределение стока. Помимо годовых величин стока большой практический интерес представляет его внутригодовое распределе-

ние. Основным фактором, определяющим как внутригодовое распределение стока (ВРС), так и его общую величину, является климат. Главными климатическими элементами, влияющими на распределение стока, служат осадки и температура воздуха, которая, в свою очередь, определяет величину суммарного испарения с поверхности водосбора. Кроме того, на распределение стока в году влияют и аональные факторы, носящие индивидуальный характер для каждой реки. К числу таких факторов следует отнести морфометрические характеристики бассейна реки, геологические условия бассейна, а также влияние хозяйственной деятельности человека.

Расчет ВРС зависит от назначения и схемы его использования, а также от типа его распределения в году. Таким образом, расчет ВРС заключается в составлении или выборе из множества возможных для данного створа случаев одного или нескольких расчетных, удовлетворяющих требованиям проектирования. При этом необходимо исходить из анализа формирования внутригодового режима стока под воздействием определяющих его факторов.

В настоящее время в практике гидрологических расчетов применяется три способа расчета ВРС: метод компоновки, метод реального года и метод среднего распределения стока за годы характерной градации водности. Метод компоновки является основным для расчета календарного ВРС, который используется при длительности рядов наблюдений не менее 15 лет. ВРС при расчете по методу компоновки определяется из условий равенства вероятностей превышения стока за водохозяйственный год, стока за лимитирующий период, внутри его за лимитирующий сезон и лимитирующий месяц по соответствующим аналитическим кривым распределения стока.

Расчеты ВРС рек производят по водохозяйственным годам, начинающимся с первого месяца многоводного сезона. В отдельных случаях возможно выполнение расчетов ВРС для гидрологических лет, начинающихся с первого месяца периода накопления влаги, или для календарных лет.

В зависимости от типа водного режима реки и преобладающего вида использования стока реки водохозяйственный год делят на два различающихся по длительности периода: лимитирующий и нелимитирующий, а лимитирующий период, соответственно, на два сезона: лимитирующий и нелимитирующий. Границы сезонов назначают едиными для всех лет с округлением до месяца.

Расчетное ВРС определяют для водохозяйственного года расчетной вероятности превышения соответствующей заданной проектной обеспеченности гарантированной отдачи. При периоде наблюдений от 15 до 30 лет выделяют три группы лет: многоводные годы ($P < 33,3 \%$), средние по водности годы ($33,3 \% \leq P \leq 66,7 \%$) и маловодные годы ($P > 66,7 \%$). При продолжительности наблюдений более 30 лет выделяют пять групп: очень многоводные годы ($P < 16,7 \%$), многоводные годы ($16,7 \% \leq P < 33,3 \%$), средние по водности годы ($33,3 \% \leq P \leq 66,7 \%$), маловодные годы ($66,7 \% < P \leq 83,3 \%$) и очень маловодные годы ($P > 83,3 \%$).



Рис. 2.8. Средний многолетний гидрограф стока по р. Ясельда – г. Береза

Во всех методах расчета по значениям стока за отдельные водохозяйственные годы определяют расчетные квантили. Стандартными квантилями кривых распределения вероятностей стока являются следующие: для многоводных лет, периодов, сезонов и месяцев – 1,0, 3,0, 5,0, 10,0, 25,0 %; для маловодных лет, периодов, сезонов и месяцев – 75,0, 90,0, 95,0, 97,0, 99,0 %, для средних по водности лет – 50,0 %.

Реки бассейна Ясельды относятся к рекам с весенним половодьем, для которых характерны следующие сезоны: весна, лето–осень, зима. На рис. 2.8 приведен средний многолетний гидрограф за водохозяйственный год по р. Ясельда – г. Береза, на котором выделены нелимитирующий период (весна: март–май), лимитирующий период (лето–осень, зима: июнь–февраль) и лимитирующий сезон (лето–осень: июнь–ноябрь).

В связи с тем, что ВРС зависит от водности сезона, расчет произведен для разных групп водности: многоводной, средней и маловодной. Из табл. 2.10 видно, что на реках, которые меньше подверглись мелиоративному и хозяйственному воздействию (р. Ясельда у д. Сенин и р. Жегулянка), основной сток проходит в весенний период для всех групп водности и составляет от 47,0 до 57,0 % от годового стока на Ясельде, от 47,0 до 72,0 % – на Жегулянке. Зимний сток на Ясельде для многоводной группы составляет 24,0 % от годового стока, для средней – 28,0, для маловодной – 13,0 %. В летне-осенний сезон на многоводную группу водности приходится 29,0 %, на среднюю – 24,0, на маловодную – 30,0 % от годового стока.

Для р. Жегулянки распределение несколько иное: на зимний период, в многоводные годы приходится 20,0 % годового стока, в средние – 12,0, в маловодные – 31,0 %, а в летне-осенний период – 25,0, 16,0 и 22,0 % соответственно.

Для малых, зарегулированных рек, к которым относятся р. Меречанка и кан. Винец, ВРС выглядит следующим образом. Для р. Меречанки в многоводные годы основной сток проходит в летне-осенний период (46,0 %), в зимний период – 25,0, в весенний – 29,0 % от годового стока. В средние по водности

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Таблица 2.10. Внутригодовое распределение стока для лет разной обеспеченности, % от годового стока

Обеспеченность года, %	Весна (месяц)				Лето-осень (месяц)								Зима (месяц)			
	III	IV	V	Σ	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Σ	XII	I	II	Σ	
<i>р. Ясельда – д. Хорева</i>																
25	15	28	13	56	4	4	6	5	4	5	28	6	5	5	16	
50	16	9	9	35	7	5	3	3	4	5	27	11	17	10	38	
75	8	7	5	20	3	3	4	9	10	13	41	17	13	10	39	
<i>р. Ясельда – г. Береза</i>																
25	16	11	6	33	4	3	3	5	4	10	30	12	13	12	37	
50	11	14	9	34	6	6	5	12	9	7	45	5	8	8	21	
75	8	7	8	24	7	6	11	15	13	7	58	7	7	5	18	
<i>р. Ясельда – д. Сенин</i>																
25	13	15	19	47	11	9	3	2	2	2	29	6	9	9	24	
50	16	20	12	48	7	5	3	2	3	3	24	3	12	14	28	
75	10	31	16	57	11	9	3	2	2	2	30	3	5	5	13	
<i>кан. Винец – д. Рыгали</i>																
25	8	4	4	16	2	2	4	10	11	15	45	21	10	9	39	
50	20	17	6	43	4	3	4	5	5	6	26	9	3	19	31	
75	9	9	7	25	3	1	2	7	13	18	44	15	8	8	31	
<i>р. Жегулянка – д. Нехачево</i>																
25	29	16	9	55	4	3	2	4	6	6	25	4	12	4	20	
50	25	33	14	72	4	2	3	2	2	2	16	5	3	4	12	
75	21	20	5	47	4	6	4	3	3	3	22	5	16	10	31	
<i>р. Мерчанка – д. Красиево</i>																
25	19	6	4	29	4	23	7	3	4	5	46	5	9	11	25	
50	23	17	8	48	5	5	5	5	5	5	28	3	12	8	24	
75	10	6	4	20	8	6	5	6	9	16	51	13	6	9	29	

годы основной сток (48,0 %) проходит в весенний сезон, в летне-осенний – 28,0, в зимний – 24,0 % от годового. В маловодные годы основной сток проходит в летне-осенний период и составляет 51,0 %, в весенний – 20,0, в зимний – 29,0 % от годового. В многоводные годы на кан. Винец основная часть стока проходит в летне-осенний период и составляет 45,0 % от годового стока. В зимний период проходит 39,0 % стока, а в весенний – только 16,0 %. В средние по водности годы основной сток проходит в весенний сезон и составляет 43,0 %, в летне-осенний период – 26,0, в зимний – 31,0 % от годового стока. Для маловодной фазы режима характерно следующее распределение: летне-осенний период – 44,0 %, зимний – 31,0, весенний – 25,0 % от годового стока.

На Ясельде у г. Береза, где сток зарегулирован вдхр. Селец, наблюдается следующее распределение стока внутри года. Для многоводной группы лет основ-

ной сток проходит в зимний период и составляет 37,0 %, в весенний период – 33,0, в летне-осенний – 30,0 % от годового стока. Основной сток для средней по водности группы лет проходит в летне-осенний период – 45,0 %, в зимний – 21,0, в весенний – 34,0 % от годового стока. Для маловодной группы лет характерно следующее распределение стока внутри года: основной сток проходит в летне-осенний период – 58,0 %, в весенний – 24,0, в зимний – 18,0 % от годового.

Распределение стока по месяцам внутри различных сезонов неодинаково. Результаты расчетов внутрисезонного распределения стока приведены в табл. 2.11.

Наиболее неравномерное внутрисезонное распределение характерно для весеннего периода. Наибольший месячный сток, как правило, наблюдается в марте или апреле и составляет 37,0–64,0 % от сезонного стока. Наименьший сток, за весенний период, наблюдается в мае и составляет 11,0–35,0 %. Это объясняется интенсивным снеготаянием в марте и апреле.

Таблица 2.11. Внутрисезонное распределение стока по бассейну Ясельды для лет различной обеспеченности, % от сезонного стока

Обеспеченность года, %	Весна (месяц)			Лето-осень (месяц)						Зима (месяц)		
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
<i>р. Ясельда – д. Хорева</i>												
25	28	49	23	13	13	22	19	15	18	37	31	33
50	45	27	27	25	20	12	11	13	18	29	44	27
75	41	35	24	7	8	9	21	24	32	43	33	25
<i>р. Ясельда – г. Береза</i>												
25	48	33	19	14	9	11	17	14	34	32	36	32
50	32	41	27	12	14	12	27	20	15	25	37	38
75	35	29	35	11	11	18	25	22	12	37	37	25
<i>р. Ясельда – д. Сенин</i>												
25	28	32	41	38	31	11	6	6	8	25	39	36
50	34	41	24	30	21	14	10	12	13	9	43	48
75	17	55	28	35	30	11	8	8	8	25	36	39
<i>кан. Винец – д. Рыгали</i>												
25	49	28	23	5	5	10	23	24	34	52	25	23
50	47	39	15	15	11	15	16	18	23	29	11	60
75	35	37	28	7	3	3	17	29	41	50	25	26
<i>р. Жегулянка – д. Нехачево</i>												
25	54	30	16	17	11	6	16	25	24	21	58	21
50	35	46	19	25	15	21	11	12	15	45	25	29
75	46	43	11	17	27	17	12	13	15	15	52	33
<i>р. Меречанка – д. Красиево</i>												
25	64	21	15	9	49	14	7	10	10	22	35	44
50	48	35	17	17	16	16	17	16	17	15	52	34
75	50	29	22	16	12	11	11	19	31	46	21	33

Распределение стока внутри летне-осеннего сезона отличается на отдельных реках. Так, на Ясельде у д. Сенин наблюдается высокий сток в июне–июле (21,0–38,0 %) затем происходит его постепенное снижение; в сентябре–октябре он достигает своих низших значений (6,0–12,0 %). К концу сезона происходит незначительное повышение стока. На р. Меречанке у с. Красиево в годы со средней водностью наблюдается равномерное распределение стока внутри сезона. В годы с малой водностью происходит увеличение стока к концу сезона, а в годы с большой водностью максимальный сток проходит в июле–августе.

В зимний сезон распределение стока рассматриваемых рек различно. В годы со средней водностью наибольшая величина стока приходится на январь или февраль, что связано с зимними паводками. В годы с малой или высокой водностью наибольший сток, как правило, проходит в декабре или феврале.

Наглядное представление о характере изменения стока в течение года дают гидрографы стока. Методом компоновки сезонов рассчитано ВРС для различных по водности лет р. Ясельды у г. Береза и у д. Сенин, гидрографы представлены на рис. 2.9. Расчеты выполнены для пяти характерных лет (5,0, 25,0, 50,0, 75,0 и 95,0 %-ной обеспеченности) с использованием программного комплекса «Гидролог» [146].

В связи с тем, что в бассейне Ясельды в 1960–70-х годах были проведены существенные мелиоративные мероприятия, а в середине 1980-х годов было введено в эксплуатацию вдхр. Селец, очевидно, что сток Ясельды и ее притоков существенно изменился под воздействием хозяйственной деятельности, особенно это сказалось на верховье Ясельды. Именно поэтому расчетный период для Ясельды в створе г. Березы принят с 1945 по 1985 г., для створа д. Сенин – с 1945 по 2014 г.

Рассмотрим изменение ВРС Ясельды в створе г. Березы, вызванное как антропогенными воздействиями, так и климатическими факторами. Для анализа изменения ВРС использован ряд инструментальных наблюдений за расходами воды с 1945 по 2013 г., который был разбит на два интервала: 1945–1987 гг. и 1988–2013 гг. Параллельно выполнены аналогичные расчеты для створа д. Сенин, где антропогенные воздействия были гораздо меньше, что позволило вычленить антропогенные воздействия. Для выделенных интервалов определено ВРС воды (табл. 2.12). В период до 1987 г. на р. Ясельде – г. Береза имело место следующее распределение сезонного стока воды в разные группы лет по водности: а) очень многоводные годы – основной сток в летне-осенний сезон, меньший – в зимний сезон; б) многоводные, средние, маловодные, очень маловодные – наибольшая доля стока в весенний сезон, наименьшая – в зимний сезон. Основной сток воды Ясельды у г. Березы в период с 1988 по 2013 г. наблюдался в летне-осенний сезон, наименьший – в зимний сезон во всех группах лет по водности. Доля летне-осеннего стока воды в годовом в среднем составляет 50,5 %, зимнего – 23,9 %; доля стока воды в весенний сезон, в % от годового, – около 25,5 %.

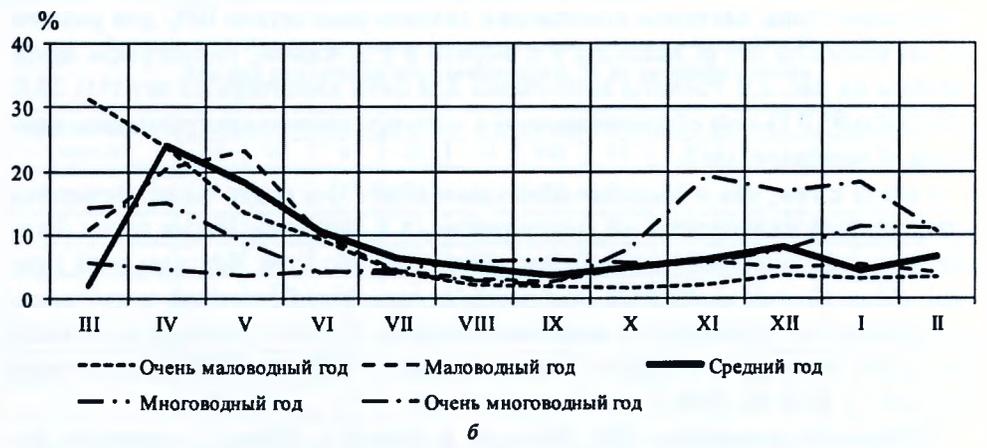
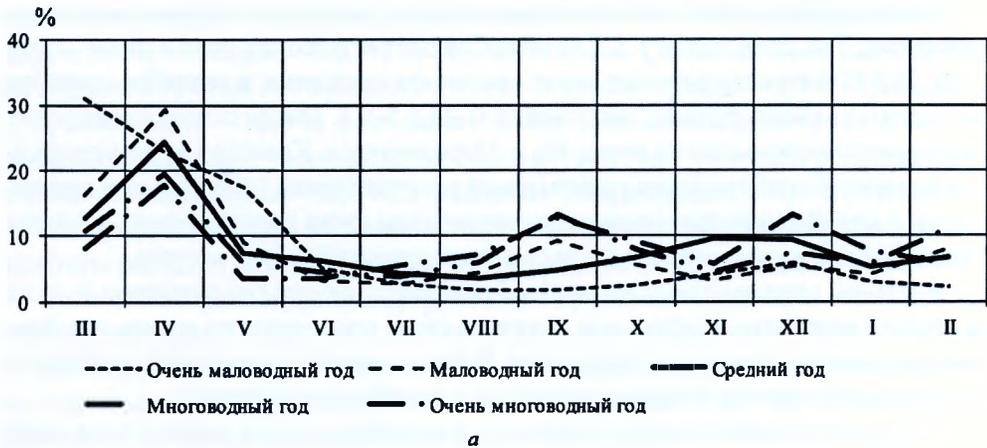


Рис. 2.9. Внутригодовое распределение годового стока: а – р. Ясельда – г. Береза; б – р. Ясельда – д. Сенин

На р. Ясельде – д. Сенин большая часть стока воды была в весенний сезон. Однако, если в период наблюдений до 1987 г., это характерно во все группы лет по водности, то в 1988–2014 гг. – в среднюю, маловодную и очень маловодную. Меньшая доля, в % от годового, для двух периодов наблюдений отмечена в зимний сезон. Она колеблется в пределах 5,3–33,0 % – в период наблюдений до 1987 г. и в пределах 21,5–30,2 % – в 1988–2014 гг. Относительно доли летне-осеннего стока воды, в 1988–2014 гг. она оказалась значительно выше и ее значения составили 29,8–41,9 %.

Таким образом, в период наблюдений с 1988 по 2013 г. по отношению к предшествующему произошло уменьшение доли весеннего и увеличение доли летне-осеннего и зимнего стока воды.

На малых реках и искусственных водотоках, где не ведутся гидрометрические наблюдения, для определения ВРС рек используют типовые схемы, содержащиеся в работе [153]. В качестве примера в табл. 2.13 приведены типовые

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Таблица 2.12. Внутригодовое распределение стока воды для лет разной обеспеченности, % от годового

P, %	Период наблюдений					
	до 1987 г.			1988–2010 гг.		
	весна	лето–осень	зима	весна	лето–осень	зима
<i>р. Ясельда – г. Береза</i>						
5	29,5	44,2	26,3	25,4	50,4	24,2
25	43,6	32,4	24,0	26,2	50,7	23,1
50	53,5	25,2	21,3	25,5	50,7	23,8
75	63,0	19,4	17,6	25,5	50,7	23,8
95	75,2	12,8	12,0	25,0	50,4	24,6
<i>р. Ясельда – д. Сенин</i>						
5	34,7	32,3	33,0	27,9	41,9	30,2
25	48,1	29,5	22,4	33,2	38,8	28,0
50	55,7	28,1	16,2	37,7	36,2	26,1
75	62,3	26,6	11,1	42,1	33,7	24,2
95	70,1	24,6	5,3	48,7	29,8	21,5

Таблица 2.13. Типовое внутригодовое распределение стока рек бассейна Ясельды

Водность года	Месячный сток, %									
	весна (месяц)			лето–осень (месяц)						
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
<i>A = 50 км²</i>										
Очень многоводный	42,6	10,4	3,7	2,5	1,8	5,5	6,9	4,8	6,9	
Многоводный	47,8	11,7	4,2	2,0	1,4	4,4	5,6	3,9	5,5	
Средний	40,9	19,8	8,9	3,8	2,2	1,6	1,9	3,2	5,1	
Маловодный	44,6	24,2	7,5	3,0	1,7	1,2	1,5	2,1	3,5	
Очень маловодный	50,6	27,5	8,6	1,4	0,8	0,6	0,7	1,0	1,6	
<i>A = 100 км²</i>										
Очень многоводный	42,4	10,4	3,6	2,5	1,8	5,5	6,8	4,8	6,8	
Многоводный	47,6	11,7	4,1	2,0	1,4	4,4	5,6	3,9	5,5	
Средний	40,7	19,8	8,8	3,9	2,3	1,7	2,0	3,2	5,3	
Маловодный	44,3	24,1	7,5	3,2	1,8	1,3	1,5	2,2	3,7	
Очень маловодный	50,2	27,3	8,5	1,6	0,9	0,7	0,8	1,1	1,8	
<i>A = 1000 км²</i>										
Очень многоводный	17,1	29,8	9,1	7,3	5,1	2,8	17,1	29,8	9,1	
Многоводный	19,3	33,6	10,1	6,0	4,2	2,3	19,3	33,6	10,1	
Средний	20,9	36,3	11,0	5,0	3,5	1,9	20,9	36,3	11,0	
Маловодный	22,6	39,3	11,9	3,9	2,8	1,5	22,6	39,3	11,9	
Очень маловодный	25,5	44,3	13,4	2,4	1,7	0,8	25,5	44,3	13,4	

Окончание табл. 2.13

Водность года	Месячный сток, %			Сезонный сток, %		
	зима (месяц)					
	XII	I	II	весна	лето-осень	зима
$A = 50 \text{ км}^2$						
Очень многоводный	4,8	2,2	7,9	56,7	28,4	14,9
Многоводный	4,3	2,0	7,2	63,7	22,8	13,5
Средний	5,5	3,2	3,9	69,6	17,8	12,6
Маловодный	5,9	2,8	2,0	76,3	13,0	10,7
Очень маловодный	4,0	1,9	1,3	86,7	6,1	7,2
$A = 100 \text{ км}^2$						
Очень многоводный	4,9	2,3	8,2	56,4	28,2	15,4
Многоводный	4,4	2,1	7,3	63,4	22,8	13,8
Средний	5,4	3,1	3,8	69,3	18,4	12,3
Маловодный	5,7	2,7	2,0	75,9	13,7	10,4
Очень маловодный	3,9	1,9	1,3	86,0	6,9	7,1
$A = 1000 \text{ км}^2$						
Очень многоводный	8,1	4,8	2,9	56,0	28,3	15,8
Многоводный	7,1	4,2	2,5	63,0	23,2	13,8
Средний	6,4	3,8	2,3	68,2	19,3	12,5
Маловодный	5,6	3,4	2,0	73,8	15,2	11,0
Очень маловодный	4,0	2,4	1,3	83,2	9,1	7,7

схемы для VI Припятского гидрологического района, подрайона «а», в котором расположена большая часть бассейна Ясельды.

Максимальный сток. Различают два вида высокого подъема воды: половодье и паводок.

Половодье – это фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и выпадением атмосферных осадков. Обычно половодье сопровождается выходом воды из русла и затоплением пойм.

Паводок – это фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды, вызывается дождями (дождевой паводок) или снеготаянием во время оттепелей.

Обычные ежегодные затопления пойм рек не только не опасны, но приносят пользу. Во время разлива рек на пойме откладываются продукты эрозии почв, обеспечивающие повышение плодородия земель. Происходит влагозарядка пойменных почв. Паводки способствуют санитарной промывке пойм, они нужны для обводнения нерестилищ рыб и т. д.

К стихийным гидрологическим явлениям, *наводнениям*, относятся высокие уровни воды в период половодий, паводков, при которых наблюдаются затопления населенных пунктов, посевов сельскохозяйственных культур, автомобильных дорог, причиняется материальный ущерб, наносится урон здоровью населения или происходит гибель людей, которые повторяются не чаще, чем 1 раз в 10 лет.

Максимальный сток рек бассейна Ясельды отмечается в двух периодах: в весеннее половодье и в паводок. Паводки, в свою очередь, подразделяются на летне-осенние, сформированные за счет осадков, и зимние, сформированные за счет таяния снежного покрова при оттепелях, иногда с добавлением атмосферных осадков.

Режим рек бассейна Ясельды имеет свои особенности, обусловленные главным образом неустойчивыми погодными условиями зимы и весны, благодаря чему на реках в одни годы формируется режим половодья, в другие – типично паводочный режим. Он формируется в годы с мягкой оттепельной зимой, когда устойчивый снежный покров отсутствует. Весенние паводки образуются в основном за счет дождей. Весеннему половодью часто предшествуют довольно высокие уровни, а в годы с более значительными оттепелями формируются зимние паводки, связанные с интенсивным таянием снега.

Половодье. Водность рек в период весеннего половодья определяется не столько запасом воды в снеге к началу весеннего половодья, увлажненностью водосборов в осенне-зимний период, сколько дружностью половодья, зависящего от интенсивности снеготаяния, и количеством осадков, выпадающих в период половодья. Например, 1951 г. характеризовался дружным развитием весенних процессов, обусловивших формирование высокого половодья. В 1952 г., наоборот, развитие весенних процессов происходило очень вяло, недружно. Несмотря на то, что запас воды в снеге был того же порядка, как и в 1951 г., половодье сформировалось крайне низкое из-за больших потерь талых вод на инфильтрацию. Большим потерям способствовала не только слабая интенсивность снеготаяния, но и создавшиеся благоприятные условия для просачивания талых вод, так как промерзание почвы происходило при весьма незначительной ее увлажненности. Кроме этого на значение максимального расхода на больших реках оказывает влияние совпадение или сдвигка во времени максимальных расходов, которые сформировались на основных притоках. На отдельных участках рек естественный режим половодий искажается действием гидротехнических сооружений.

Половодье в бассейне Ясельды характеризуется как невысокое, с наибольшей продолжительностью в бассейне Припяти (без учета самой Припяти). Период потепления (с 1988 г.) отразился на сроках начала половодья – они сдвинулись на более ранние даты. Начало весеннего половодья приходится в среднем на 1-ую декаду марта, ранние сроки – на 3-ю декаду января, поздние – на 1-ую декаду апреля. Пик половодья наблюдается во второй половине марта.

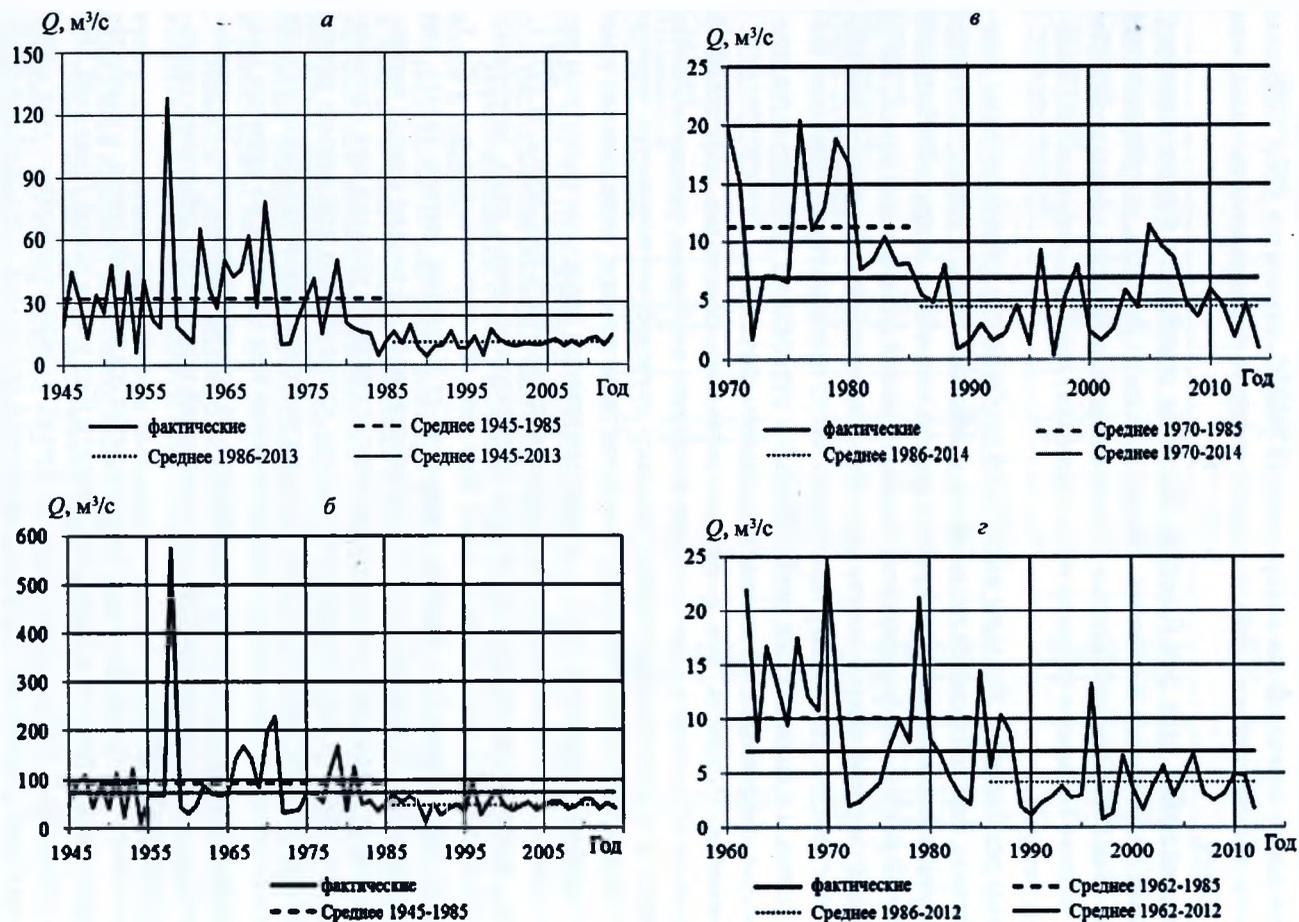


Рис. 2.10. Многолетний ход максимальных расходов воды половодья на реках: *a* – р. Ясельда – г. Береза; *б* – р. Ясельда – д. Сенин; *в* – р. Меречанка – д. Красиёво; *г* – кан. Винец – д. Рыгали

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Продолжительность половодья в среднем составляет 45–75 дней на Ясельде и 30–40 дней на ее притоках. Окончание половодья приходится в среднем на конец апреля в верховье Ясельды и на 3-ю декаду мая – в низовье, на притоках этой реки – на первую половину апреля.

Во время весеннего половодья на Ясельде и ее притоках в среднем проходит от 22,0 до 45,0 % суммарного стока за год.

На рис. 2.10 представлен хронологический ход максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна Ясельды. Наибольший расход в бассейне наблюдался в 1958 г. Так, на Ясельде у д. Сенин он составил 575 м³/с, что соответствует 0,3 %-ной вероятности превышения. Начиная с 1980-х годов, максимальные значения расходов оказались меньше среднего многолетнего значения (74,7 м³/с) практически во все годы, кроме 1981, 1996 и 1998 г. Согласно требованиям нормативных документов, при выполнении гидрологических расчетов, рекомендуется использовать несколько независимых методов [153], поэтому расходы воды весеннего половодья различной вероятности превышения определены с использованием трехпараметрического распределения Крицкого–Менкеля и распределения Пирсона III типа. Коэффициенты вариации наибольших расходов половодья изменяются от 0,45 до 1,12 для Ясельды и от 0,79 до 0,85 для ее притоков (табл. 2.14).

Наиболее важной фазой уровня режима является весеннее половодье, которое сопровождается разливами и затоплениями пойм, а в отдельные годы –

Таблица 2.14. Максимальные расходы воды половодья различной вероятности превышения и их статистические параметры

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Мерчанка – д. Красиево	кан. Винец – д. Рыгали	
Количество лет наблюдений	20	65	68	44	47	
Период наблюдений, гг.	1972–1991	1945–2013	1945–2014	1970–2014	1962–2012	
Среднее значение стока, м ³ /с	11,50 ± 0,18	23,90 ± 2,63	74,70 ± 9,04	6,95 ± 1,50	7,37 ± 1,30	
Коэффициент автокорреляции	0,44	0,17	0,04	0,57	0,40	
<i>Трехпараметрическое гамма-распределение</i>						
Норма стока, м ³ /с	11,9	25,0	77,0	7,25	7,63	
Коэффициент вариации (C_v)	0,45	0,96	1,12	0,79	0,85	
Соотношение (C_s/C_v)	4,5	4,0	4,0	3,0	3,0	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	0,1 %	40,9	204	801	40,3	49,2
	1,0 %	28,2	112	411	25,8	30,4
	3,0 %	23,0	79,0	279	19,7	22,6
	5,0 %	20,8	65,5	226	17,1	19,3
	10,0 %	17,8	49,5	163	13,6	15,1
	25,0 %	14,0	31,0	94,7	9,28	9,77
	50,0 %	10,9	18,6	51,6	5,93	5,95

Окончание табл. 2.14

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Меречанка – д. Красиево	кан. Винец – д. Рыгали	
<i>Распределение Пирсона III типа</i>						
Норма стока, м ³ /с	11,9	25,0	80,7	6,95	7,63	
Коэффициент вариации (C_v)	0,45	0,96	1,12	0,81	0,83	
Коэффициент асимметрии (C_g)	1,2	3,0	5,8	1,4	1,8	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	0,1 %	37,6	195	954	35,7	43,4
	1,0 %	28,7	122	504	25,4	29,8
	3,0 %	24,2	88,7	315	20,4	23,2
	5,0 %	22,1	72,2	228	18,0	20,2
	10,0 %	19,0	52,1	132	14,5	16,0
	25,0 %	14,6	29,5	68,1	9,72	10,3
	50,0 %	10,8	15,4	49,2	5,70	5,85

затоплениями населенных пунктов, расположенных в пониженных местах. Изменчивость слоев стока за половодье в бассейне Ясельды, характеризуемая коэффициентом вариации, достаточна высока – от 0,60 до 0,85. Наибольшие значения слоя стока колеблются от 92 (1970 г.) до 157 мм (1958 г.), в годы средние по водности – от 33 до 52 мм (табл. 2.15).

Таблица 2.15. Максимальные слои стока половодья (h , мм)

Период наблюдений, гг. / число лет	За период наблюдений		Норма стока	Вероятность превышения, %					
	h_{\max} / год	$h_{\text{ср}}$		0,1	1,0	3,0	5,0	10,0	25,0
<i>р. Ясельда – г. Береза ($A_{\text{водсб}} = 1040 \text{ км}^2$)</i>									
1976–2012 / 37	101 / 1978	31	33	206	137	105	90	69	43
<i>р. Ясельда – д. Сенин ($A_{\text{водсб}} = 5110 \text{ км}^2$)</i>									
1944–2012 / 69	157 / 1958	50	52	225	161	129	115	94	66
<i>кан. Винец – д. Рыгали ($A_{\text{водсб}} = 205 \text{ км}^2$)</i>									
1962–2012 / 51	92 / 1970	36	38	143	107	88	80	67	49
<i>р. Меречанка – д. Красиево ($A_{\text{водсб}} = 131 \text{ км}^2$)</i>									
1974–2012 / 38	100 / 1978	31	34	201	135	104	90	70	45

Слой стока весеннего половодья 1,0 %-ной вероятности превышения колеблется от 107 до 161 мм, незначительно превышая наблюдаемые наибольшие значения слоя стока.

Пространственная структура распределения среднемноголетнего весеннего половодья по бассейну представлена на рис. 2.11 [153].

Наиболее значительные наводнения, вызванные весенним половодьем за период инструментальных наблюдений на Ясельде, приведены в табл. 2.16.

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

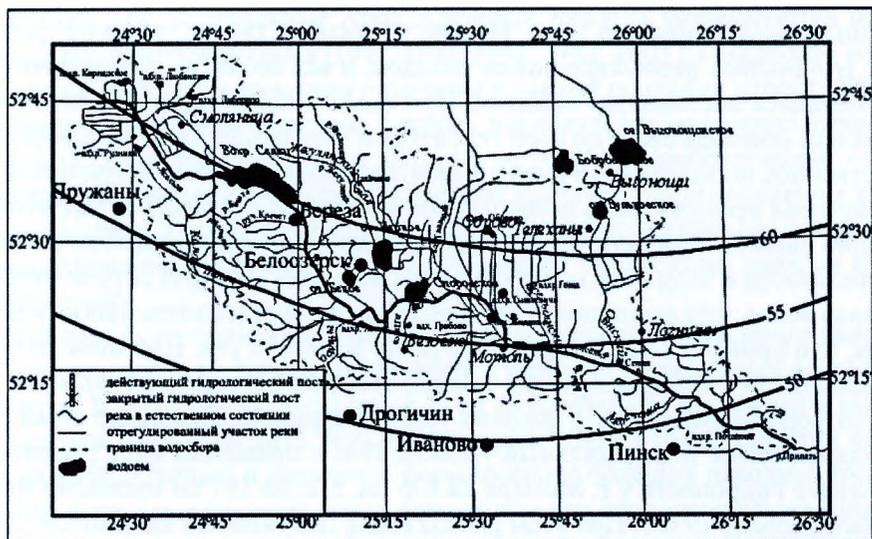


Рис. 2.11. Карта среднемноголетнего слоя стока весеннего половодья рек бассейна Ясельды, мм

Таблица 2.16. Годы с наводнениями в период весенних половодий на р. Ясельда – д. Сенин

Наводнение		
катастрофическое $P < 1 - 1,0 \%$	выдающееся $P = 1 - 2,0 \%$	большое $P = 3 - 10,0 \%$
—	1999 г.	1958, 1979, 1981 г.

В практической жизни нас больше интересуют не процессы формирования половодья, а его высота, т. е. высокие, очень высокие и катастрофические наводнения. За период систематических наблюдений за весенним стоком такие половодья наблюдались в 1932, 1958, 1979 г. Естественно, возникает стремление заглянуть в глубь веков. Ценнейшим источником для восстановления гидрологических сведений являются архивные фонды государственных исторических архивов. Наиболее полное описание гидрологического режима рек за прошлые столетия представлено в работах Г. И. Швеца [209]. Рассмотрим чрезвычайно высокие известные половодья в Полесье, сформировавшиеся в 1845 и 1877 г.

Максимальное значение стока весеннего половодья на реках Полесья отмечено в 1845 г., когда сформировалось чрезвычайно высокое весеннее половодье на большом пространстве Восточной Европы. В бассейне Припяти оно было столь катастрофическим, что его, вероятно, можно отнести к группе предельно возможных в нашу климатическую эпоху.

Половодье 1845 г. в бассейне Припяти – это уникальное гидрологическое явление весьма редкой повторяемости. Осеннее увлажнение в бассейне Припяти было существенным. Реки покрылись льдом при значительной глубине воды, обширных разливах в болотах и прилегающих территориях. Зима в 1844 г.

наступила необыкновенно рано. Ноябрь и декабрь 1844 г., а также февраль 1845 г. отличались необыкновенным холодом, и вся весна, до мая включительно, отмечалась постоянным холодом. При такой продолжительности эта зима отличалась обилием снега по всей территории Восточной Европы. Кроме того, существенное пополнение снеготаяния произошло во время февральской метели, которая продолжалась несколько дней и охватила большую территорию, особенно бассейн Припяти. Весна была поздняя, дружная, при этом развитие растительности в этом году опоздало почти на целый месяц. В апреле наступила теплая весна, при ясной погоде возросли дружность и интенсивность снеготаяния, что привело к стремительному росту водности рек. Вдобавок ко всему при сильном потеплении прошли дожди, которые усилили снеготаяние, что вызвало формирование очень высоких уровней и резкое повышение стока воды на реках бассейна. Максимальный уровень 1845 г. превышал нуль графика современного гидропоста у г. Мозыря на 675 см, т. е. на 187 см превысил максимальный уровень 1932 г. При этом расход воды, полученный косвенным способом, Г. И. Швецом оценивается как $11\,000\text{ м}^3/\text{с}$ при модуле стока $113\text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ [209]. Принимая во внимание высоту максимального уровня 1845 г., условия формирования половодья, а также выявленные данные за историческое время, можно допустить, что, по меньшей мере, с конца XIV в. и до настоящего времени высота этого половодья является непревзойденной [209, 233]. Максимальный уровень и расход Припяти в половодье 1845 г. приближенно можно считать повторяющимся не чаще чем один раз в 800 лет.

Второе по величине половодье наблюдалось в 1877 г. В этом году на огромной территории сформировалось высокое половодье, охватившее бассейны рек от Дуная и Немана до Иртыша. Значительным половодье было в бассейне Припяти. Максимальный уровень у г. Мозыря достигал 589 см, что на 86 см ниже максимального наблюдаемого уровня, максимальный расход при этом составил $7500\text{ м}^3/\text{с}$.

Анализ систематических наблюдений на гидрологических постах более чем за 100-летний период и архивных материалов показывают, что многоводные весны с высокими половодьями повторяются 2–3 года подряд с перерывом между ними 10 лет и более.

Паводки. На Ясельде паводки бывают почти ежегодно и наблюдаются в различное время года. Нередко они приводят к затоплению пойменных территорий и приносят существенный материальный ущерб.

Различают дождевые паводки, приуроченные к летне-осеннему периоду, и зимние паводки, формирующиеся в зимний период.

Формирование дождевых паводков на Ясельде связано с длительными и интенсивными дождями и ливнями, которые обычно приходят со стороны Атлантического океана с циклонами, образующимися на полярном и арктическом фронтах. В зимнее время с циклонами связаны оттепели, которые вызывают таяние снега и льда на реках, выпадение осадков и, как следствие этого,

зимние паводки. В отдельные годы дождевые паводки формируются весной на спаде весеннего половодья (1951, 1962, 1982, 1985, 2005 г.). Наиболее ранние даты начала дождевых паводков отмечены в первой половине апреля (1975 г.).

Величина паводков в первую очередь определяется метеорологическими факторами, главную роль среди которых играют стокообразующие осадки и предшествовавшие им метеорологические условия, сформировавшие влагозапасы бассейна. От количества, интенсивности, продолжительности осадков, их распределения по площади водосбора зависит объем стока паводка и форма гидрографа.

Наиболее благоприятные условия для формирования дождевых паводков наблюдаются после весеннего снеготаяния в условиях насыщенных влагой почвогрунтов. В этом случае выпадение даже относительно небольшого количества осадков может вызвать большие паводки. Летом из-за больших потерь воды на инфильтрацию и испарение формирование больших паводков происходит лишь в случае выпадения серии дождей или при продолжительном дождливом периоде. Осенью паводки формируются в результате выпадения частых обложных дождей в условиях уменьшения испарения, пониженной инфильтрационной способности почв.

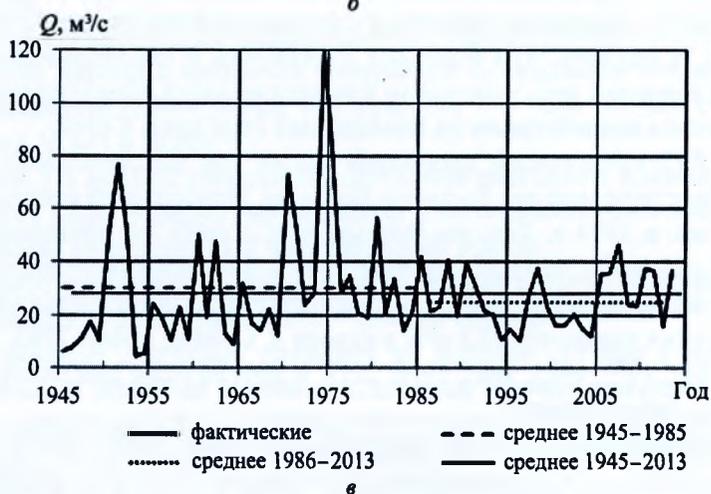
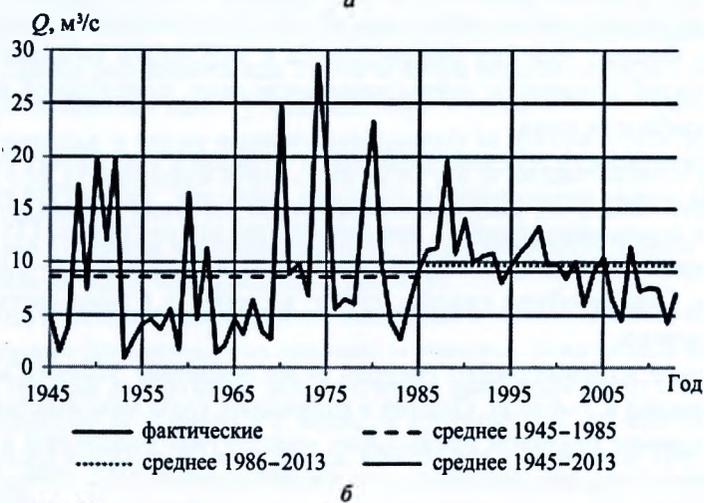
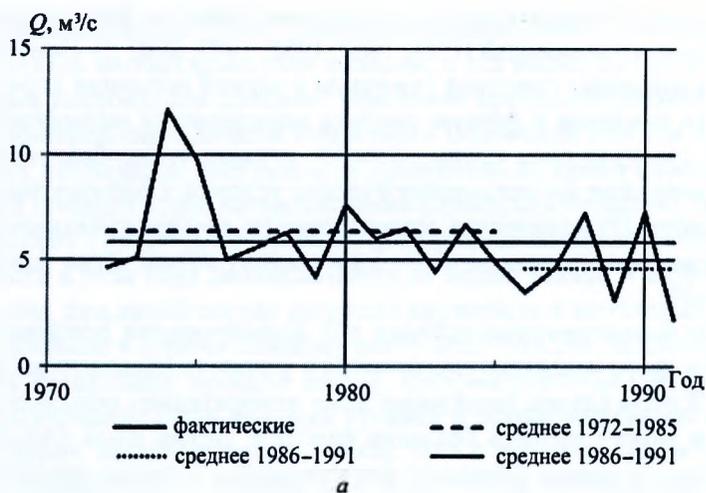
Продолжительность дождевых паводков в среднем составляет 20–30 дней. При этом она может варьировать в широких пределах. Так, в 1974 г. на Ясельде у д. Сенин продолжительность дождевого паводка составила 135 дней.

На дождевые паводки на Ясельде приходится в среднем 15,0–20,0 % от годового стока. Однако объем паводка 1974 г. в створе д. Сенин составил около 80,0 % от годового.

По величине максимального расхода воды дождевые паводки меньше весенних половодий в 3–4 раза. Однако в отдельные годы максимальные расходы воды дождевых паводков превышают максимумы половодий и являются наибольшими в году, как например, это наблюдалось в 1952, 1960, 1974, 1980, 1990, 1997, 2005 г. В среднем дождевые паводки на Ясельде превышают половодья в 20,0 % случаев, что особенно участилось в последние десятилетия и во многом связано с наблюдаемыми климатическими изменениями, а также с регулирующим воздействием на паводочный сток вдхр. Селец.

На рис. 2.12 представлен хронологический ход максимальных расходов воды дождевых паводков рек бассейна Ясельды. Наибольший расход в бассейне наблюдался в 1974 г. Так, на Ясельде у д. Сенин он составил 120 м³/с, а у г. Береза – 28,8 м³/с, что соответствует 0,6 %-ной вероятности превышения. Далее максимальные величины паводков незначительно отличались от средних многолетних значений (28,2 м³/с в створе д. Сенин), кроме 1980, 1985, 1988 и 1990 г. В 1953, 1957, 1963, 1967, 1976, 2012 и другие годы дождевых паводков на Ясельде не наблюдалось.

Максимальные расходы воды паводков различной вероятности превышения, определенные с использованием трехпараметрического распределения



2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

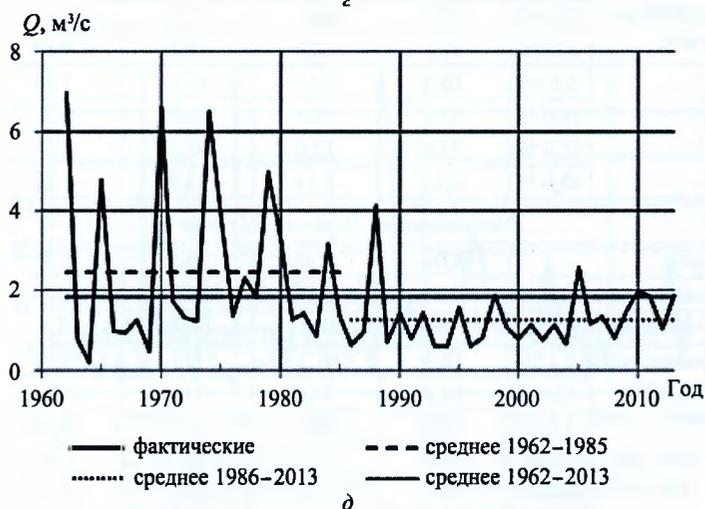
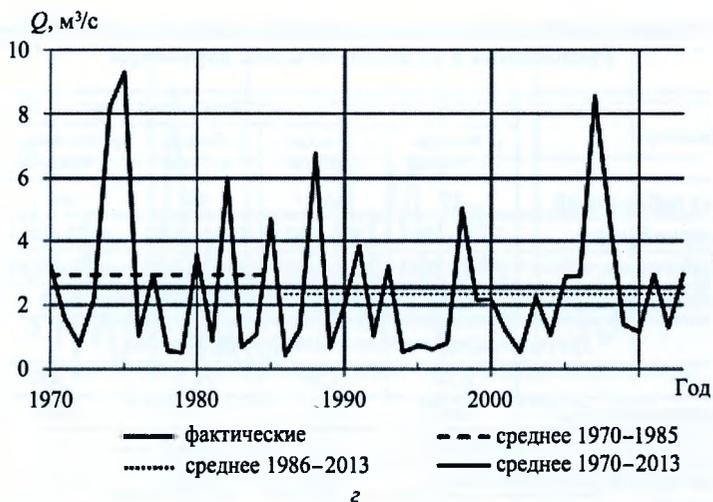


Рис. 2.12. Многолетний ход максимальных расходов воды дождевых паводков на реках: а – р. Ясельда – д. Хорева; б – р. Ясельда – г. Береза; в – р. Ясельда – д. Сенин; г – р. Меречанка – д. Красицево; д – кан. Винец – д. Рыгали

Крицкого–Менкеля и распределения Пирсона III типа, представлены в табл. 2.17. Коэффициенты вариации наибольших расходов воды паводков изменяются от 0,42 до 0,78 для Ясельды и от 0,95 до 1,07 для ее притоков.

Зимние паводки по величине своего максимального расхода несколько меньше дождевых. Однако зимой 1980–1981 гг. на р. Ясельде – д. Сенин сформировался зимний паводок, максимальный расход воды которого превысил дождевые паводки, наблюдаемые за весь период инструментальных наблюдений на Ясельде. Кроме того, зимний паводок 1980–1981 гг. превзошел другие зимние паводки более чем в 2,0 раза и оказался сопоставимым по величине

Таблица 2.17. Максимальные расходы воды дождевых паводков различной вероятности превышения и их статистические параметры

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Меречанка – д. Красиево	кан. Винец – д. Рыгали	
Количество лет наблюдений	20	69	69	44	52	
Период наблюдений, годы	1972–1991	1945–2013	1945–2013	1970–2013	1962–2013	
Среднее значение стока, м ³ /с	5,84 ± 0,51	9,10 ± 0,73	28,2 ± 3,53	2,57 ± 0,39	1,84 ± 0,24	
Коэффициент автокорреляции	0,02	0,19	0,32	0,02	–0,01	
<i>Трехпараметрическое гамма-распределение</i>						
Норма стока, м ³ /с	6,04	9,38	29,2	2,63	1,95	
Коэффициент вариации (C_v)	0,42	0,67	0,78	1,07	0,97	
Соотношение (C_s/C_v)	5,0	2,5	4,0	3,5	3,5	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	0,1 %	21,4	40,4	178	24,2	16,0
	1,0 %	14,4	28,4	105	13,2	8,99
	3,0 %	11,7	22,9	78,5	9,18	6,39
	5,0 %	10,5	20,3	67,0	7,54	5,30
	10,0 %	9,02	16,8	53,0	5,57	3,99
	25,0 %	7,08	12,0	36,2	3,31	2,45
	50,0 %	5,55	8,13	23,9	1,82	1,41
<i>Распределение Пирсона III типа</i>						
Норма стока, м ³ /с	6,04	9,38	29,2	2,55	1,95	
Коэффициент вариации (C_v)	0,42	0,67	0,77	1,04	0,95	
Коэффициент асимметрии (C_s)	1,4	1,4	2,4	2,4	2,8	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	0,1 %	18,8	41,5	173	19,5	14,7
	1,0 %	14,2	30,0	114	12,6	9,30
	3,0 %	12,0	24,2	87,8	9,46	6,86
	5,0 %	10,9	21,7	74,3	7,86	5,66
	10,0 %	9,41	17,8	57,4	5,87	4,14
	25,0 %	7,27	12,5	35,7	3,32	2,35
	50,0 %	5,49	7,99	21,3	1,62	1,22

с весенними половодьями 10 %-ной обеспеченности. Большие зимние паводки отмечались также в 1961, 1990, 1998 г. В отдельные годы зимние паводки отсутствовали (1962–1967 гг. и др.) (рис. 2.13).

На р. Ясельде – г. Береза наибольшие зимние паводки отмечались в 1957 г. (27,2 м³/с), 1975 г. (26,1 м³/с) и 1982 г. (20,4 м³/с). В последние десятилетия в связи с наблюдаемым ростом температуры воздуха, в условиях учащения оттепелей зимние паводки стали чаще, что привело к снижению величины их максимальных расходов.

Многолетние характеристики слоев стока наибольших в году паводков теплого и холодного периодов представлены в табл. 2.18. Изменчивость слоев стока паводков в бассейне Ясельды выше, чем максимальных расходов воды,

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

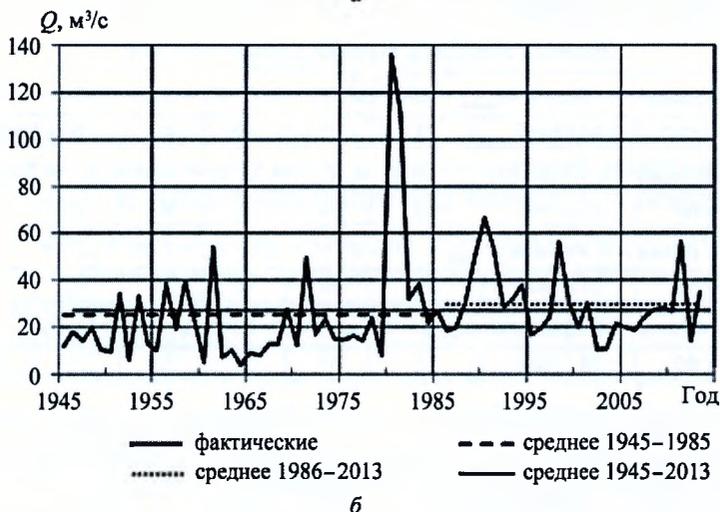
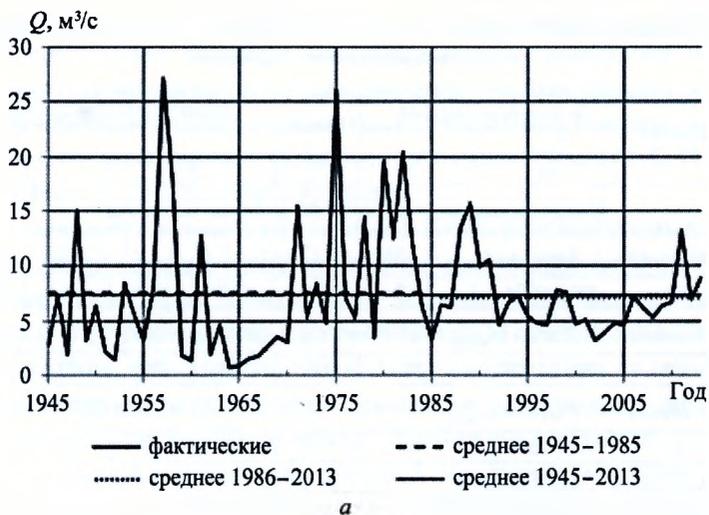


Рис. 2.13. Многолетний ход максимальных расходов воды зимних паводков на Ясельде в створах: а – г. Береза; б – д. Сенин

и колеблется от 0,79 до 1,89 для дождевых паводков, от 0,73 до 0,92 для зимних паводков. Наибольшие значения слоя стока дождевых паводков наблюдались в 1974 г. в створе д. Сенин (165 мм).

Самым значительным дождевым паводком на Ясельде был осенний паводок 1974 г. Он сформировался в результате выпадения значительного количества осадков в конце сентября – октябре (несколько месячных норм), которые явились следствием прохождения серии циклонов. Выпавшие осадки в конце сентября значительно увеличили запас общей влаги в почвогрунтах и повысили уровень грунтовых вод. Влагозапасы в пониженных местах достигали полной влагоемкости. Все это привело к задержке инфильтрации выпавших осадков,

Таблица 2.18. Многолетние характеристики слоев стока (h , мм) наибольших паводков теплого и холодного периодов

Период наблюдений / число лет	За период наблюдений		Вероятность превышения, %					
	$\frac{h_{\max}}{\text{год}}$	$h_{\text{ср}}$	0,1	1,0	3,0	5,0	10,0	25,0
Паводки теплого периода (дождевые паводки)								
<i>р. Ясельда – г. Береза ($A_{\text{водсб}} = 1040 \text{ км}^2$, $C_V = 0,83$; $C_S = 1,45$; $C_S/C_V = 1,76$)</i>								
1945–2013 / 69	94 / 1974	25,8	129	95,6	82,8	70,2	53,1	35,3
<i>р. Ясельда – д. Сенин ($A_{\text{водсб}} = 5110 \text{ км}^2$, $C_V = 1,89$; $C_S = 5,28$; $C_S/C_V = 2,76$)</i>								
1945–2013 / 69	165 / 1974	26	329	171	106	75	41	14
<i>кан. Винец – д. Рыгали ($A_{\text{водсб}} = 205 \text{ км}^2$, $C_V = 1,20$; $C_S = 3,00$; $C_S/C_V = 3,00$)</i>								
1962–2013 / 52	59 / 1974	11	112	65	49	35	24	11
<i>р. Меречанка – Красиево ($A_{\text{водсб}} = 131 \text{ км}^2$, $C_V = 0,79$; $C_S = 1,74$; $C_S/C_V = 2,03$)</i>								
1974–2013 / 40	35 / 2007	12	63	44	37	30	24	16
Паводки холодного периода (зимние паводки)								
<i>р. Ясельда – г. Береза ($A_{\text{водсб}} = 1040 \text{ км}^2$, $C_V = 0,77$; $C_S = 2,00$; $C_S/C_V = 2,35$)</i>								
1945–2013 / 69	44 / 1957	13	72	49	40	33	26	17
<i>р. Ясельда – д. Сенин ($A_{\text{водсб}} = 5110 \text{ км}^2$, $C_V = 0,73$; $C_S = 1,86$; $C_S/C_V = 2,48$)</i>								
1945–2013 / 69	25 / 1981	9,0	46	32	27	22	18	12
<i>кан. Винец – д. Рыгали ($A_{\text{водсб}} = 205 \text{ км}^2$, $C_V = 0,92$; $C_S = 2,03$; $C_S/C_V = 2,21$)</i>								
1962–2013 / 52	37 / 1975	11	68	46	39	30	23	14
<i>р. Меречанка – д. Красиево ($A_{\text{водсб}} = 131 \text{ км}^2$, $C_V = 0,74$; $C_S = 1,88$; $C_S/C_V = 2,54$)</i>								
1974–2013 / 40	28 / 2010	11	57	39	32	27	21	14

застаиванию воды на бессточных участках и увеличению стока дождевых вод в русла рек. В результате ряд дождевых паводков, последовательно наложившись друг на друга, образовали один общий подъем. В условиях насыщения почвогрунтов до полной влагоемкости и застоя воды на поверхности, подъема и выхода грунтовых вод над поверхностью почвы и разлива речных вод произошло слияние дождевых и речных вод, вызвавших образование большого паводка, перешедшего в наводнение.

О предельных максимумах стока рек. Максимальные расходы весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков являются расчетными величинами при проектировании и эксплуатации разного рода гидротехнических сооружений. От правильной оценки максимального расхода зависит долговечность и экономичность искусственных сооружений мелиоративных каналов, дорожных водопропускных сооружений и т. п.

В настоящее время хорошо разработаны методы расчета максимальных расходов для средних и больших водосборов, где, как правило, имеются наблюдения за стоком [153].

Для каждого физико-географического и климатического региона существует свое предельное значение максимального паводочного и дождевого стока. Вероятность превышения таких максимумов приближается к нулю.

Наиболее полно методика определения предельных максимумов ливневого стока и менее – паводочного разработана в исследованиях Е. В. Болдакова, М. М. Журавлева, Д. Л. Соколовского и др.

Методы оценки предельных максимумов стока, рекомендуемых Е. В. Болдаковым и М. М. Журавлевым, требуют наличия материалов наблюдений над стоком за относительно продолжительный период, тогда как расчетная схема Д. Л. Соколовского этого не предполагает. Основой метода Д. Л. Соколовского является положение, что наибольшая интенсивность стока со склонов в русле не может превысить в естественном состоянии наибольшую интенсивность дождя или снеготаяния за определенный промежуток времени.

Не касаясь деталей этого метода, который достаточно подробно описан в работе [174], рассмотрим окончательную расчетную формулу, которая имеет вид

$$q_{п.м} = \frac{A_{\max} \alpha \delta K_p K_c}{(A + C)^n}, \quad (2.12)$$

где $q_{п.м}$ – предельный модуль стока, $м^3/с \cdot км^2$; A_{\max} – максимальная интенсивность водоотдачи со склонов, $мм/ч$; α – элементарный коэффициент стока; δ – коэффициент, учитывающий влияние леса и болот; K_p – коэффициент размерности, равный 0,278; K_c – коэффициент перехода от интенсивности снеготаяния к интенсивности водоотдачи, равный 1,3 для весеннего половодья; A – площадь водосбора, $км^2$; C и n – параметры, постоянные для данного физико-географического района.

При предельном суточном максимуме осадков для территории Беларуси, равном 200 мм, величина $A_{\max д}$ равна 66 мм/ч – для ливневых дождей и 25,4 мм/ч – для обложных дождей.

Исследования условий формирования дождевого паводочного стока, проведенные при составлении справочника [161], показали, что дождевые паводки образуются от обложных дождей. Ливни, выпадающие в летний период, как правило, кратковременные и не вызывают значительных паводков даже на небольших водосборах. Поэтому в качестве расчетной принимаем величину $A_{\max д} = 25,4$ мм/ч. При $K_p = 0,28$ и $\alpha = 1$ числитель расчетной формулы равен 7,18, т. е. предельный модуль дождевого стока для территории республики достигает значения $7,1 м^3/(с \cdot км^2)$.

Максимальная интенсивность водоотдачи талых вод по П. П. Кузьмину равна 10,5 мм/ч. При $K_p = 0,28$, $K_c = 1,3$, $\alpha = 0,9$ предельный модуль стока половодья для Беларуси равен $3,4 м^3/(с \cdot км^2)$. Полученные модули можно принимать в качестве расчетных.

Минимальный сток. Это одна из главных характеристик стока рек. Характеристики минимального стока являются расчетными при гидрологическом

обосновании различных водохозяйственных и водоохраных проектов, а именно: проектирование гидростанций для выработки энергии, водоснабжение городов, сельских населенных пунктов, водного транспорта. Величина минимального стока необходима при расчетах сброса сточных вод и самоочищения воды в реках, определении возможности судоходства и лесосплава, особенно при решении важнейшей проблемы, связанной с мелиорацией земель. В последнее время в нашей республике уделяется много внимания развитию туризма (экотуризма), в том числе и водного. Водный туризм на Ясельде возможен в течение полугода, с апреля по ноябрь, а наиболее востребованный период – лето, хотя сплавные отрезки в летне-осеннюю межень укорачиваются. В связи с этим для развития водного туризма также необходимо разрабатывать сезонные прогнозные модели. В результате заборов воды происходит истощение речного стока, а при сбросах даже очищенных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых стоков наблюдается изменение качества воды. И в том и в другом случае последствием может стать ухудшение экологического состояния реки.

Прежде чем приступить к анализу процессов формирования минимального стока на Ясельде, рассмотрим основные понятия, используемые при анализе минимального стока.

В годовом цикле изменения водности рек отчетливо выделяются многоводные и маловодные сезоны. На Ясельде наблюдаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний. Данные маловодные сезоны являются смежными и в целом образуют маловодный период года. Необходимо отметить, что понятие «маловодный период» не является синонимом понятия «маловодный цикл». Последний используется при оценке многолетних колебаний речного стока и относится к группе (серии) маловодных лет, в которые величина стока значительно ниже нормы. Речной сток, наблюдающийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков, принято называть *меженным*, а время – *меженным периодом*, понимая фазу водного режима реки, наблюдающуюся в летне-осенний или зимний сезоны и характеризующуюся наличием относительно малых, устойчивых по величине расходов воды [22]. В меженный период включаются паводки, если величина объема каждого из них не превышает 10,0–15,0 % объема стока за меженный период, предшествующий и последующий этому паводку. При частых и различных по величине паводках (пилообразный вид гидрографа) в меженный период не включаются паводки с максимальными расходами воды, превышающими предшествующие среднесуточные минимумы больше чем в 3,0–5,0 раз (чем больше объем пика паводка, тем меньше должна быть величина превышения).

В межном периоде имеется отрезок времени, когда сток является наименьшим. Период наименьшего стока продолжительностью от 1 до 30 дней называется периодом минимального стока. На Ясельде выделяются зимний и летне-осенний сезоны, 30-дневный период, когда река питается в основном лишь подземными водами. Такое разграничение понятий «меженный» и «ми-

нимальный сток» позволяет более надежно осуществить исследование условий их формирования и произвести соответствующие обобщения.

В гидрологической литературе, особенно в зарубежной, до сих пор не существует четкого разделения понятий «меженный» и «минимальный сток». В работах английских и американских авторов эти понятия нередко объединяются общим термином «низкий сток» (low flow, или low runoff).

Минимальный сток – наименьший по величине сток, обычно наблюдающийся в межень. *Периодом минимального стока* называют отрезок времени от 1 до 30 сут. внутри меженного периода, когда наблюдаются наименьшие расходы воды. Опорные характеристики минимального стока – минимальные среднесуточные расходы воды и минимальные 30-дневные расходы. Последние представляют собой средний расход за 30 сут. внутри летне-осенней или зимней межени (рассматриваются отдельно) с наиболее низким стоком. Введение в практику гидрологических и водохозяйственных расчетов минимального 30-дневного расхода вместо минимального среднемесячного вызвано необходимостью исключить влияние календарных месяцев, превысивших оценки низкого стока в условиях прерывистой межени. В зависимости от целей водохозяйственных расчетов применяются также величины 7- и 10-дневных минимальных расходов воды. Большое значение имеет определение этих характеристик при назначении минимально допустимых расходов воды, оставляемых в реках при осуществлении водозабора и устройства водохранилищ, расчета предельных величин сбросных расходов воды. В практике водохозяйственного проектирования основное применение находят величины минимального стока-обеспеченностей в диапазоне 75,0–99,0 %, характеризующие годы с мало-водной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95 %-ной обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий [105, 207].

Различают характеристики минимального стока: суточные минимальные расходы воды с разделением их на летние и зимние за каждый год; среднемесячные минимальные расходы воды с разделением их на летние и зимние за каждый год; средние многолетние значения (нормы) суточных минимальных расходов воды; средние многолетние значения (нормы) среднемесячных минимальных расходов воды; минимумы различной обеспеченности; абсолютные минимумы – наименьший расход воды за весь многолетний период наблюдений.

Для определения расчетного минимального расхода используют данные наблюдений по стоку за зимний и летне-осенний периоды. Расчет ведут по среднемесячным расходам, по средним расходам за 30 сут. с наименьшим стоком, по среднесуточным расходам.

Среднемесячные расходы рекомендуется использовать для расчета в том случае, когда меженный период продолжительный и устойчивый (длится не менее двух месяцев, и в течение этого времени на реке нет паводков).

Минимальные расходы, средние за 30 сут., с наименьшим стоком используются при короткой и прерывистой межени. Короткой считают межень продолжительностью меньше двух месяцев; прерывистой – если она прерывается паводками. Минимальный 30-суточный некалендарный сток определяется путем построения гидрографов стока исследуемой реки по годам за весь период наблюдений, на которых выделяется участок продолжительностью 30 сут. с наименьшими расходами воды, и по таблице ежедневных расходов воды производят подсчет среднего расхода воды за выбранный период. Минимальные 30-суточные расходы воды всегда меньше или равны среднемесячным календарным расходам воды. При использовании водных ресурсов в маловодный период большое значение имеет оценка критического, или так называемого *лимитирующего стока*, т. е. расходов воды за маловодный сезон (или сезоны), в который водное хозяйство испытывает наибольшую нужду в воде или наибольшие трудности с водоснабжением. Это понятие имеет смысл при сопоставлении естественных водных ресурсов с потребностями в них народного хозяйства. Те периоды времени, в течение которых возможны длительные перебои в обеспечении водой хозяйственных мероприятий, относятся к категории лимитирующих [21, 22].

Весеннее половодье в бассейне Ясельды сменяется летне-осенней меженью, когда уровни воды достигают наиболее низких значений. Ее продолжительность составляет 135–165 сут. Бывают случаи пересыхания малых рек в жаркую летнюю межень на срок до 3,5 месяцев.

Условия формирования меженного стока рек рассматриваемого бассейна можно считать в целом благоприятными, так как он находится в зоне избыточного увлажнения, где отток подземных вод в речную сеть более или менее длителен и стабилен, поэтому питание поверхностных водотоков подземными водами в этой зоне постоянное.

Для рек бассейна Ясельды характерно наличие двух периодов низкого стока в году: летне-осеннего и зимнего (см. рис. 2.1). Летне-осенняя межень наступает в конце мая – середине июня и заканчивается в октябре (около 170 сут.). В отдельные годы при отсутствии осенних паводков летне-осенняя межень может продолжаться до появления ледовых образований и заканчивается в конце ноября – середине декабря. Наиболее маловодный период летне-осенней межени в основном наблюдается в июле–августе, реже в сентябре. Зимняя межень обычно устанавливается в конце ноября – середине декабря. Она более устойчивая, но с большими расходами. В отдельные годы межень прерывается зимними паводками и состоит из 2–4 периодов продолжительностью 5–15 дней. На рис. 2.14 представлен хронологический ход минимальных летне-осенних расходов воды рек бассейна Ясельды.

Рассматриваемый период разбит на два интервала с начала наблюдений до 1985 г. (ввод в эксплуатацию вдхр. «Селец») и с 1986 по 2014 г. На всех реках произошло увеличение минимального летне-осеннего стока, вызванное природными факторами, и, в большей степени, антропогенными воздействиями. Наиболее заметное увеличение произошло в створе г. Березы. Это вызвано в первую очередь вводом в эксплуатацию водохранилища сезонно-годового регулирования «Селец» и одноименного рыбхоза, что увеличило попуски воды из водохранилища в летний период. Кроме того, массовая мелиорация бассейна привела к углублению и увеличению речной сети, что вызвало дренирование более глубоких грунтовых вод. Исследования показали, что в условиях изменения гидрографической сети (увеличение густоты водопроводящей сети, спрямление речных русел, их обвалование и, как следствие, улучшение условий дренирования грунтовых вод и облегчение стока летних осадков) минимальный сток Ясельды и ее притоков возрастает [71, 198]. На малых реках в летне-осенний период отмечено повышение уровня воды за счет того, что русло зарастает высшей водной растительностью. К естественным факторам можно отнести некоторое перераспределение режима выпадения атмосферных осадков.

За периоды наблюдений наиболее низкими величинами летне-осеннего минимального стока на Ясельде в створе г. Березы отличались 1953 и 1964 г., наибольшие минимальные значения превышали наименьшие в 75,0 раз и более в 2011 и 1988 г. В створе д. Сенин минимальная водность в летне-осенний период наблюдалась в 1951 и 1953 г., максимальная водность в этот период – в 1988 и 1998 г.; их соотношение составило – 27,0 раз.

Аналогичные изменения произошли и с минимальными зимними расходами воды, но здесь на первый план выходят природные факторы (рис. 2.15). Частые зимние оттепели привели к пополнению запасов грунтовых вод и увеличению в первую очередь зимних минимальных расходов, что в некоторой степени привело к увеличению минимальных летне-осенних расходов воды. За периоды наблюдений наиболее низкими величинами зимнего минимального стока на Ясельде в створе г. Березы отличались 1954 и 1956 г., наибольшие минимальные значения превышали наименьшие в 60,0 раз и более в 1975 и 1981 г. В створе д. Сенин годы с минимальной водностью в летне-осенний период были 1956 и 1947 г., максимальная водность в этот период – в 1981 и 1975 г.; их соотношение составило – 38,0 раз.

В табл. 2.19 и 2.20 представлены выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов летне-осеннего и зимнего минимального стока Ясельды и ее притоков. Коэффициент вариации изменяется от 0,46 до 0,99 (для зимнего минимального стока) и от 0,35 до 0,74 (для летне-осеннего минимального стока), а коэффициент асимметрии – от 0,60 до 3,0 и от 0,0 до 1,6 соответственно.

Забор воды из реки ведет к общему уменьшению речного стока, а ее загрязнение практически дает тот же результат, уменьшая количество чистой воды.



а



б



в

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

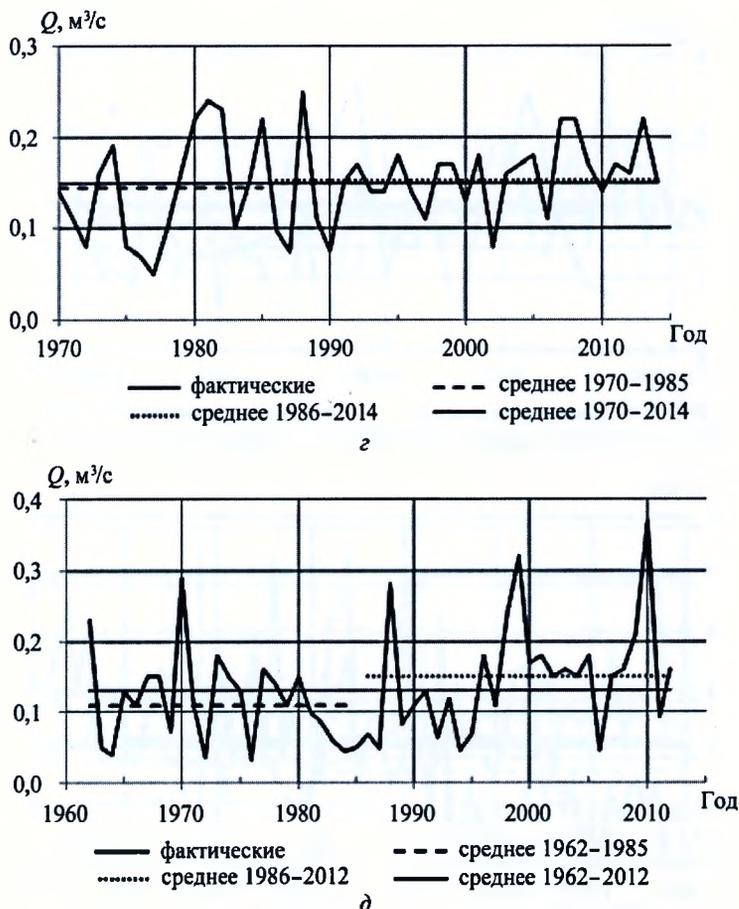
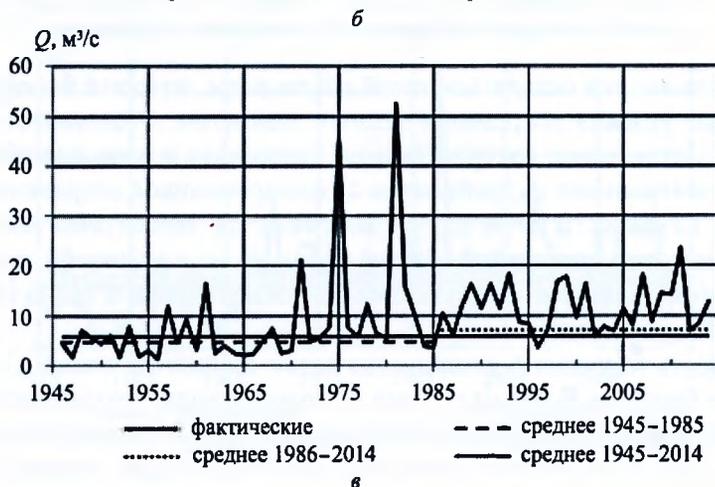


Рис. 2.14. Многолетний ход минимальных летне-осенних расходов воды на реках:
а – р. Ясельда – д. Хорева; *б* – р. Ясельда – г. Береза; *в* – р. Ясельда – д. Сенин;
з – р. Меречанка – д. Красиево; *д* – кан. Винец – д. Рыгали

Однако в реке должен оставаться такой объем воды, который бы обеспечивал минимальные условия сохранения водных экосистем. *Экологический сток* – это то количество воды, которое должно оставаться в реке для обеспечения условий существования гидробионтов с одновременным сохранением ее необходимого качества. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Таким образом, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период года.

Изученность вопросов формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока в бассейне Ясельды отстает от возрастающих потребностей народного хозяйства региона. В последнее время большое внимание уделяется качественному состоянию водных ресурсов, геоэкологической оценке, гидроэко-



2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

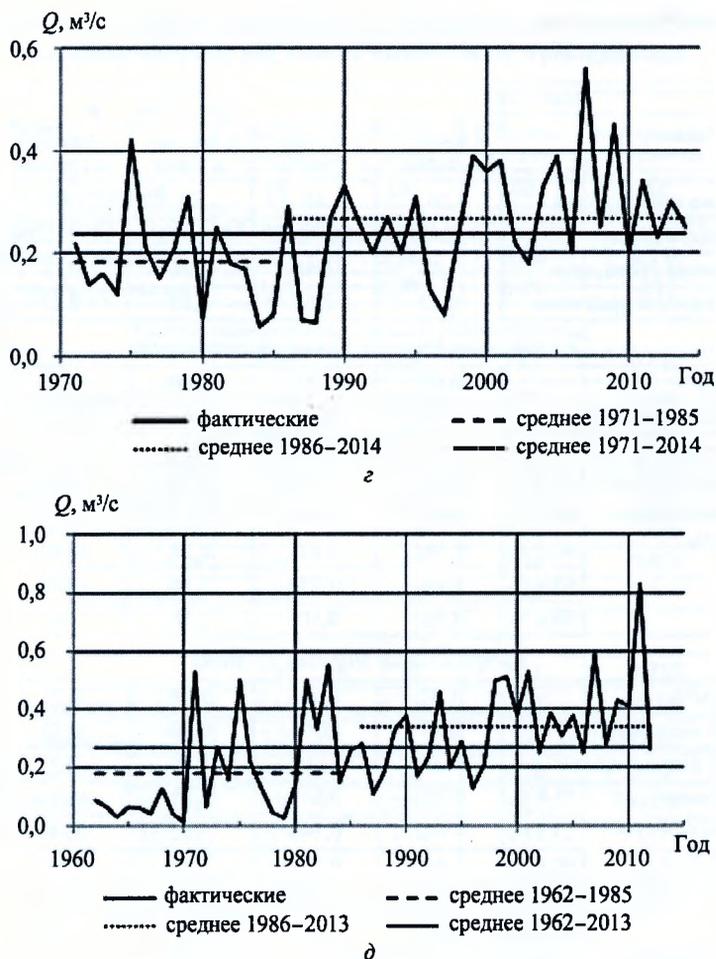


Рис. 2.15. Многолетний ход минимальных зимних расходов воды на реках: *a* – р. Ясельда – д. Хорева; *б* – р. Ясельда – г. Береза; *в* – р. Ясельда – д. Сенин; *г* – р. Меречанка – д. Красиево; *д* – кан. Винец – д. Рыгали

логическим исследованиям. При любом виде хозяйственного освоения водных ресурсов возникает проблема учета и оценки нижнего предела расхода воды, который необходимо оставлять в реке и не включать в хозяйственное использование и тем более изъятие.

Хотя Ясельда и относится к категории малых рек, но имеет важное хозяйственное значение для промышленно развитых населенных пунктов, расположенных на реке (г. Береза, г. Белоозерск, д. Мотоль и т. д.). Кроме того, в верховье реки расположено крупное вдхр. Селец, основное назначение которого – обеспечение водой рыбхоза «Селец». Водопотребление рыбхоза составляет значительную часть объема стока реки в данном створе.

Таблица 2.19. Статистические параметры и расходы воды расчетной обеспеченности минимального летне-осеннего стока рек бассейна Ясельды

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Меречанка – д. Красиево	кан. Винец – д. Рыгали	
Количество лет наблюдений	20	68	69	45	51	
Период наблюдений, гг.	1972–1991	1945–2013	1946–2014	1970–2014	1962–2012	
Среднее значение стока, м ³ /с	1,04	1,46	5,74	0,15	0,133	
Коэффициент автокорреляции	0,43	0,66	0,22	0,17	0,11	
<i>Трехпараметрическое гамма-распределение</i>						
Норма стока, м ³ /с	1,07	1,52	5,84	0,15	0,136	
Коэффициент вариации (C_V)	0,47	0,70	0,62	0,35	0,60	
Соотношение (C_S/C_V)	3,5	2,0	4,0	1,5	3,0	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	75,0 %	0,725	0,741	3,50	0,081	0,078
	80,0 %	0,675	0,635	3,22	0,068	0,070
	90,0 %	0,560	0,411	2,58	0,040	0,054
	95,0 %	0,481	0,273	2,16	0,020	0,043
	99,0 %	0,363	0,115	1,56	0	0,028
<i>Распределение Пирсона III типа</i>						
Норма стока, м ³ /с	1,07	1,46	5,84	0,15	0,136	
Коэффициент вариации (C_V)	0,47	0,74	0,60	0,35	0,59	
Коэффициент асимметрии (C_S)	1,0	1,0	1,6	0,0	1,2	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	75,0 %	0,703	0,677	3,30	0,114	0,077
	80,0 %	0,642	0,548	3,02	0,105	0,069
	90,0 %	0,499	0,247	2,39	0,082	0,050
	95,0 %	0,402	0,0426	2,01	0,063	0,037
	99,0 %	0,265	0	1,66	0,027	0,020

Таким образом, обоснование предельных объемов стока для Ясельды, является не только сложной теоретической, но и важной практической задачей. С позиции наибольших заборов воды рыбхозом «Селец» и сброса сточных вод в пределах г. Березы, наиболее экологически напряженным можно рассматривать участок реки от створа вдхр. Селец до автомобильной дороги Брест–Минск (М1). Для данного участка выполнен анализ параметров минимально допустимого (экологического) стока.

В общем случае, как указывалось в работах [22, 98, 99, 165, 190], экологически допустимый сток должен учитывать следующие факторы:

– объем, необходимый для нормального развития гидробионтов. В этом случае требуется сохранять скорости течения воды в диапазоне 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором начинается бурное развитие фитопланктона) при глубине потока – не менее 0,1–3,0 м. Важным периодом с точки зрения средообразующих функций являются меженные

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Таблица 2.20. Статистические параметры и расходы воды расчетной обеспеченности минимального зимнего стока рек бассейна Ясельды

Параметр	Река – створ					
	р. Ясельда – д. Хорева	р. Ясельда – г. Береза	р. Ясельда – д. Сенин	р. Меречанка – д. Красеево	кан. Винец – д. Рыгали	
Количество лет наблюдений	20	68	69	44	51	
Период наблюдений, гг.	1972–1991	1945–2013	1946–2014	1971–2014	1962–2012	
Среднее значение стока, м ³ /с	1,93	2,16	9,66	0,238	0,269	
Коэффициент автокорреляции	0,22	0,39	0,09	0,11	0,28	
<i>Трехпараметрическое гамма-распределение</i>						
Норма стока, м ³ /с	2,02	2,22	10,1	0,242	0,276	
Коэффициент вариации (C_v)	0,46	0,66	0,99	0,49	0,68	
Соотношение (C_s/C_v)	4,0	2,0	4,5	2,0	2,0	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	75,0 %	1,42	1,19	4,60	0,105	0,098
	80,0 %	1,33	1,06	4,09	0,086	0,074
	90,0 %	1,14	0,736	3,00	0,043	0,031
	95,0 %	1,00	0,526	2,34	0,014	0,009
	99,0 %	0,793	0,258	1,48	0	0
<i>Распределение Пирсона III типа</i>						
Норма стока, м ³ /с	1,97	2,16	10,1	0,238	0,269	
Коэффициент вариации (C_v)	0,46	0,70	0,93	0,50	0,72	
Коэффициент асимметрии (C_s)	1,2	1,0	3,0	0,6	1,0	
Расход воды расчетной обеспеченности обеспеченностью, м ³ /с	75,0 %	1,30	1,08	4,26	0,153	0,128
	80,0 %	1,21	0,901	4,07	0,137	0,105
	90,0 %	0,992	0,485	3,87	0,096	0,051
	95,0 %	0,847	0,203	3,84	0,066	0,014
	99,0 %	0,657	0	3,83	0,015	0

периоды лета и зимы. Однако при средней мощности ледообразования от 17 до 45 см на юге и до 29–64 см на севере и северо-востоке может наблюдаться гибель ихтиофауны;

– выполнение рекой ее природных функций. Речная сеть транспортирует вещества и энергию, таким образом перераспределяя их во времени и в пространстве;

– внутригодовую изменчивость стока. Наличие изменчивости стока реки в течение года поддерживает естественную цикличность в развитии различных биологических видов;

– изменчивость стока по годам. Как и внутригодовая изменчивость, колебания объемов стока по годам позволяют обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление уничтожает гидрофобные растения, заселяющие пойму в маловодный период.

В период активного развития промышленного производства XX в. использовалось понятие минимального стока. Однако оно в большей степени было

направленно на учет потребности человека в водных ресурсах. Кроме того, минимальное количество воды, поступающей в нижний бьеф, было связано с наличием водопотребителей ниже по течению реки. Естественно, с учетом современного мировоззрения такие предпосылки к оценке минимального стока являются неприемлемыми.

В настоящее время разработаны различные способы оценки величины экологического стока, которые условно объединены в четыре группы [91]. Рассмотрим их в отдельности.

Способ минимальных расходов. Как указано в работе [22], размер минимального (экологического) стока принимается равным минимальному среднемесячному стоку 95,0 %-ной обеспеченности. Кроме того, исходя из рекомендаций работы [79], объем экологического стока принимается в зависимости от вариации годового стока реки. При значительной изменчивости годового стока экологический сток может доходить по абсолютному значению до минимального годового стока. Экологический сток определяется как доля от расчетной величины (табл. 2.21) [98].

Таблица 2.21. Критерии определения экологического стока

Коэффициент вариации C_v	Размер экологического стока	Способ градации	Размер экологического стока
Менее 0,25	Минимальный месячный сток	Ручьи	3,0 % от минимального суточного стока
0,25–0,40	Минимальный меженный сток	Малые реки	20,0 % от минимального суточного стока
Более 0,40	Минимальный годовой сток	Средние реки	75,0 % от минимального месячного стока 95 %-ной обеспеченности

В Беларуси размер экологического стока $Q_{\text{эко}}$ принимается как 75,0 % от минимального месячного стока $Q_{\text{мин. мес.}}$ 95,0 %-ной обеспеченности. В Украине оценка экологического стока производится по формуле

$$Q_{\text{эко}} = K Q_{\text{мин. мес.}}, \quad (2.13)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от класса реки и среднесноголетнего ее стока (табл. 2.22).

Таблица 2.22. Зависимость коэффициента пропорциональности от класса реки

Размер водотока	Среднесноголетний сток, м ³ /с	K
Ручьи и малые реки	Менее 10	0,30
Малые и средние реки	10–50	0,35
Средние реки	50–200	0,40
Крупные реки	Более 200	0,45

В Швейцарии величина экологического стока регламентирована размером площади водосбора [98], а точнее минимальным экологическим модулем стока:

$$Q_{\text{эко}} = Aq_{\text{эко}}, \quad (2.14)$$

где A – площадь водосбора реки, км²; $q_{\text{эко}}$ – минимальный модуль стока, принимаемый равным 1 л/с на 1 км².

Данный подход не в полной мере соответствует вышеперечисленным требованиям: не обеспечивает внутригодовую изменчивость стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не достигается минимальная скорость течения воды.

Способ натуральных исследований. Применение данного способа основано на выполнении полевых или лабораторных исследований. Этот способ наиболее часто применяется для важных с экологической точки зрения объектов. Сложность реализации его связана со значительными экономическими затратами, а также необходимостью проведения продолжительных непрерывных наблюдений. В настоящее время широкое распространение получили автономные автоматизированные пункты гидрологического мониторинга, накапливающие всю необходимую информацию для достоверной оценки размеров экологического стока. При этом реализуются все требования, предъявляемые к величине экологически обоснованного минимального стока реки.

Однако, как и в иных отраслях народного хозяйства, остается проблема оценки предельных антропогенных нагрузок (объемов сброса сточных вод, их химического состава и режима сброса) обеспечивающих условия существования и развития геocenозов. Причем предельные экологически обоснованные характеристики водотока в каждом отдельном случае будут своими. Так, с точки зрения условий рыбного хозяйства, ключевым фактором будет являться количество кислорода, растворенного в воде; при этом геолого-минералогические условия могут существенно влиять на количество кислорода.

Способ повышения обеспеченности. Данный способ подразумевает выделение нижнего и верхнего предела изменения стока, практически встречающегося на реальной реке [199, 200]. Суть метода заключается в установлении нижнего предела экологически допустимого стока на уровне месячных расходов для года 99,0 %-ной обеспеченности, так как эти условия являются предельными с точки зрения природопользования. В большинстве случаев, при обеспеченности более 90,0 % на реках Беларуси не наблюдается затопления пойменной части, а если затопление все-таки происходит, то оно носит местный характер, связанный с локальным рельефом.

В качестве верхнего предела принимается расход 50,0 %-ной обеспеченности. В этих условиях формируется нормальный режим обмена веществом и энергией в пределах геосистемы река–пойма. Как указано в работах [98, 99], наибольшая продуктивность речных и пойменных экосистем наблюдается при обеспеченности в пределах 40,0–60,0 % (рис. 2.16).

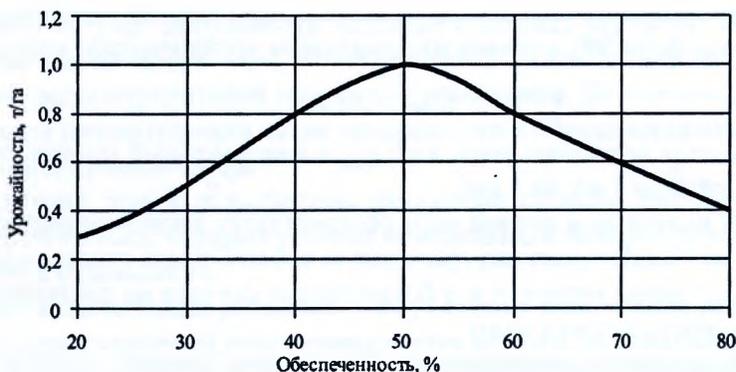


Рис. 2.16. Зависимость урожайности заливных лугов от обеспеченности стока половодья [173]

Определение параметров функции распределения экологического стока основывается на переносе обеспеченности среднегодового стока к заранее определенным обеспеченностям экологического стока: предполагается, что экологический сток 95,0 %-ной обеспеченности соответствует среднегодовому стоку 99,0 %-ной обеспеченности, а экологический сток 25,0 %-ной обеспеченности принимается равным стоку 50,0 %-ной обеспеченности. Имея две точки кривой функции распределения случайной величины можно подобрать ее параметры. Однако применение данного подхода ограничивает диапазон применяемых теоретических кривых распределений (применимы только две параметрические функции распределения). Кроме того, применение перехода 99,0 % → 95,0 % и 50,0 % → 25,0 % видится достаточно субъективным и не всегда может быть использовано в качестве проектного либо директивного. Как указано в работе [98], применение данного подхода наиболее эффективно для крупных рек. В условиях Беларуси, где составление водохозяйственного баланса нацелено в основном на малые или средние реки, применение этого метода не всегда эффективно и обоснованно.

Способ пропорциональных расходов. Применение данного метода основано на пропорциональном выделении экологического стока как доли стока реки в текущий момент времени. В этом случае используется некий коэффициент пропорциональности K , характерный для конкретных условий. С учетом коэффициента пропорциональности величина экологического стока $Q_i^{\text{эко}}$ в i -тый интервал времени определяется зависимостью

$$Q_i^{\text{эко}} = Q_i K_i. \quad (2.15)$$

Применение данного подхода требует проведения натурных исследований с привлечением специалистов биологического направления. Указанный подход получил широкое распространение в Западной Европе. К его недостаткам можно отнести отсутствие обоснованных подходов к оценке коэффициентов пропорциональности в различных природных условиях. При условии разра-

ботки нормативных подходов к определению данного коэффициента рассматриваемый подход может быть эффективным.

Как описано в работе [98], в случае применения способа пропорциональных расходов в качестве минимального расхода реки необходимо принимать или среднемесячный расход для года 75,0 %-ной обеспеченности или же среднегодовой расход 80,0–90,0 %. Данные предпосылки основаны на анализе формы функции плотности распределения стока рек при различных значениях коэффициентов вариации. Кроме того, выбор нижней границы продиктован особенностями формирования стока реки из таких источников, как поверхностный сток, грунтовый сток и грунтово-напорный сток. Предполагается, что минимальное значение стока реки будет достигнуто при отсутствии поверхностной и грунтовой составляющей, однако данное явление наблюдается крайне редко и не может рассматриваться как нижний предел экологически обоснованного стока реки [159].

Изменчивость стока в многолетнем разрезе должна обеспечиваться за счет цикличности в водности рек [72]. Таким образом, при разработке схемы управления водным режимом и составлении водохозяйственного баланса для водохранилищ многолетнего регулирования необходимо предусматривать повышенные среднегодовые расходы не реже естественной цикличности.

Внутригодовая изменчивость стока реки является бесспорной необходимостью любой геосистемы, имеющей в своей структуре водотоки с трансформированным водным режимом. Для обеспечения внутригодовой изменчивости рассматривают три основных сезона: зима, лето–осень, весна. В период летне-осенней межени в речной сети протекают активные биологические процессы, за данный период происходит наибольший прирост биомассы водной и прибрежной растительности. С точки зрения проектирования системы управления природопользованием в данных условиях индикатором продуктивности биоценозов будет являться глубина воды в реке (средняя глубина). В различных природных условиях оптимальная глубина реки с позиции максимальной продуктивности будет различной.

Рассматривая результаты эксперимента, приведенного в работе [98], продуктивность фитоценозов будет иметь восходящую и нисходящую ветви. Нисходящая ветвь, связанная со значительным повышением глубины, для нас является менее интересной. Рассмотрим восходящую ветвь, которой обеспечение выживания растений достигается при расходах 90,0–95,0 %-ной обеспеченности. Данные расходы приемлемы только для периода летне-осенней межени. В общем случае необходимо проводить натурные исследования, на основе которых в расчетном створе составляется зависимость расхода реки от средней глубины потока. При этом может еще использоваться зависимость расхода реки от средней скорости потока. В настоящее время данные показатели широко используются в нормативной литературе, например, при оценке предельно допустимого объема сброса сточных вод в водотоки. При наличии данных

многолетних наблюдений в рассматриваемом створе задача реализуется достаточно просто. При отсутствии таковых, для построения зависимости расхода реки от средней глубины может быть использован способ, изложенный в работе [31]. В данном случае для оценки измеренного значения обеспеченности используются данные наблюдений за расходом рек-аналогов или исходной реки в другом створе.

Сток реки в зимний период в первую очередь должен обеспечивать минимальное количество кислорода в воде и не допускать ее промерзания. Анализ графика функции плотности распределения вероятностей расходов воды рек показал, что левая точка перегиба соответствует появлению поверхностного питания. Исходя из этого, значение расхода реки в левой точке перегиба функции плотности распределения может приниматься в качестве экологического стока в зимний период [98].

Экологический сток в весенний период определяется исходя из предельной величины объема транспортируемых наносов. Условием нормального функционирования реки является баланс объемов частиц, осажденных и перемещенных вдоль по течению. Весенний период характеризуется значительным объемом воды и твердых частиц. Осажденные частицы за меженные периоды должны быть перемещены вниз по течению, иначе могут наблюдаться явления заиления водотока, а это приводит к снижению его глубины, что, в свою очередь, является неблагоприятным фактором развития геосистемы водотока.

Предельный объем весеннего стока определяется на основе натуральных наблюдений за мутностью в течение года. Предполагается, что объем весеннего стока должен быть не менее доли K_w от общего годового объема стока [98, 206]:

$$W_v = W_r K_w, \quad (2.16)$$

где W_v – предельный объем стока за весенний период, м³; W_r – объем стока за весенний период, м³.

Коэффициент K_w может определяться по зависимости

$$K_w = \frac{\rho}{\rho + \rho_{пр}}, \quad (2.17)$$

где ρ и $\rho_{пр}$ – соответственно мутность воды за год в целом и за весенний период (предельная), г/м³.

Обобщая вышесказанное, можно выделить способ пропорциональных расходов как наиболее развитый с точки зрения учета локальных особенностей реки и вероятностных характеристик стока. Однако данный подход не имеет широкого распространения и требует всесторонней проверки его эффективности на конкретных речных системах.

Для уточнения стока Ясельды в створе водохранилища выполнены гидрологические исследования. Оценка расходов различной обеспеченности выполнялась по гидрометрическому посту р. Ясельда – г. Береза. Так как водохрани-

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

лище сезонного регулирования, существенного влияния на годовой сток оно не оказывает и среднегодовой расход можно рассматривать как естественный сток. При этом восстановление данных наблюдений не требуется и для анализа используется весь доступный ряд наблюдений (1945–2013 гг.). Анализ однородности подтвердил выдвинутую гипотезу.

Перенос характеристик стока на исследуемый створ осуществляли с помощью модулей стока различных обеспеченностей с использованием площади водосбора. Площадь водосбора в трех створах определяли на основе цифровой модели рельефа (DEM) и алгоритма анализа структуры поверхностного стока. В данном случае анализировали только поверхностный сток, так как в большинстве случаев для крупных водосборов грунтовый сток копирует поверхностный. Для работы алгоритма был выполнен анализ замкнутых локальных понижений рельефа. Выявленные локальные понижения «раскрывались» в направлении генерального рельефа. Таким образом, получена карта водосборных площадей (рис. 2.17).

На основе вычисления геометрии водосборов получены значения их площадей. Площадь водосбора составила: в створе д. Хорева 663 км², в створе вдхр. Селец – 858, в створе гидрометрического поста г. Березы – 1131 км². Полученные водоразделы анализировали на предмет переброски стока за счет мелиоративных каналов. Было выделено несколько участков с незначительным изменением водораздела, однако суммарная площадь данных участков составила менее 0,5 % от площади водосбора данной реки в створе д. Хорева, поэтому дальнейшие расчеты проводили с использованием полученных площадей водосборов. На основе значений модулей стока в створах д. Хорева и г. Березы определен среднегодовой сток в створе рассматриваемого водохранилища.

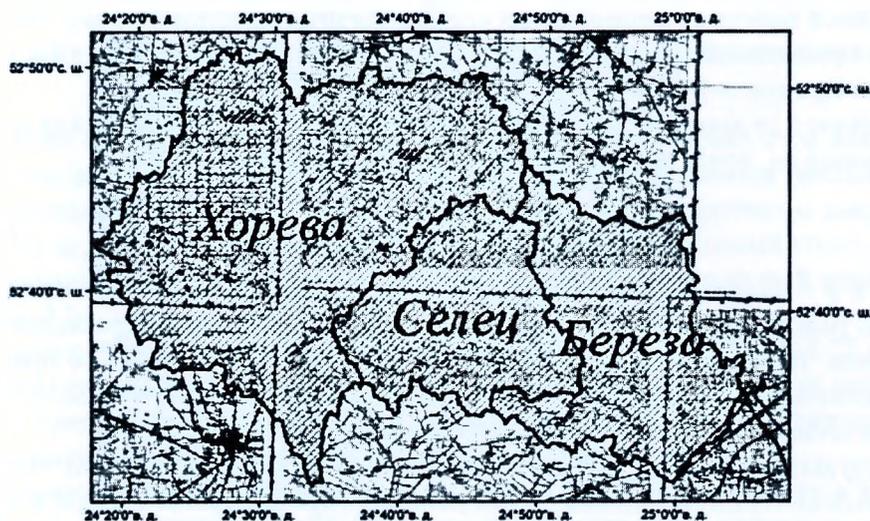


Рис. 2.17. Карта площадей водосборов по основным створам

Из данных, приведенных в табл. 2.23, видно, что модули стока по постам г. Березы и д. Хорева значительно отличаются, это связано с различиями в формировании стока. В створе д. Хорева Ясельда имеет более высокие модули стока. В этой связи для оценки стока в створе водохранилища в дальнейшем использованы данные наблюдений по гидрометрическому посту в г. Березе.

Таблица 2.23. Расходы Ясельды различной обеспеченности в створе водохранилища

Обеспеченность, %-ная	Среднегодовой расход, м ³ /с		Модуль стока, л/(с·км ²)			Среднегодовой расход, м ³ /с
	г. Береза	д. Хорева	г. Береза	д. Хорева	вдхр. Селец	
5,0	7,63	5,02	6,742	7,930	6,742	5,78
25,0	5,50	3,92	4,863	6,193	4,863	4,17
50,0	4,42	3,27	3,908	5,166	3,908	3,35
75,0	3,57	2,69	3,156	4,250	3,156	2,71
90,0	3,00	2,25	2,648	3,555	2,648	2,27
95,0	2,71	2,02	2,396	3,191	2,396	2,06
99,0	2,30	1,62	2,034	2,559	2,034	1,74

В соответствии со способом *минимальных расходов* определен экологический сток на основе данных табл. 2.21. С учетом класса Ясельды, относящейся к малым рекам, экологический сток составляет 20 % от минимального среднесуточного стока. Анализ среднемесячных минимальных расходов позволил выявить изменения в особенностях формирования стока (рис. 2.18), происходящего на период до введения в эксплуатацию вдхр. Селец. В связи с этим для дальнейшей работы по методу *минимальных расходов* был использован период наблюдений 1945–1985 гг. Анализ эмпирической кривой распределения случайной величины минимальных среднемесячных расходов показал, что наиболее приемлемой теоретической кривой плотности распределения является кривая Крицкого–Менкеля (рис. 2.19).

Переход от минимального среднемесячного расхода осуществляли по рекомендациям, приведенным в работе [153]:

$$Q_{\text{сут}} = aQ_{\text{р}} - \frac{bA}{1000}, \quad (2.18)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты регрессии, определяемые как средние по району по связи суточных и 30-суточных минимальных расходов рек-аналогов. В случае невозможности подобрать реки-аналоги, можно принять для летне-осеннего периода $a = 0,89$, $b = 0,09$, а для зимнего – $a = 0,86$, $b = 0,11$ соответственно; A – площадь водосбора до расчетного створа, км².

Результаты расчетов представлены в табл. 2.24, из которой видно, что экологический сток при высоких обеспеченностях приближается к нулю; в очень маловодные годы в соответствии с данным методом могут отсутствовать пуски в нижний бьеф водохранилища.

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

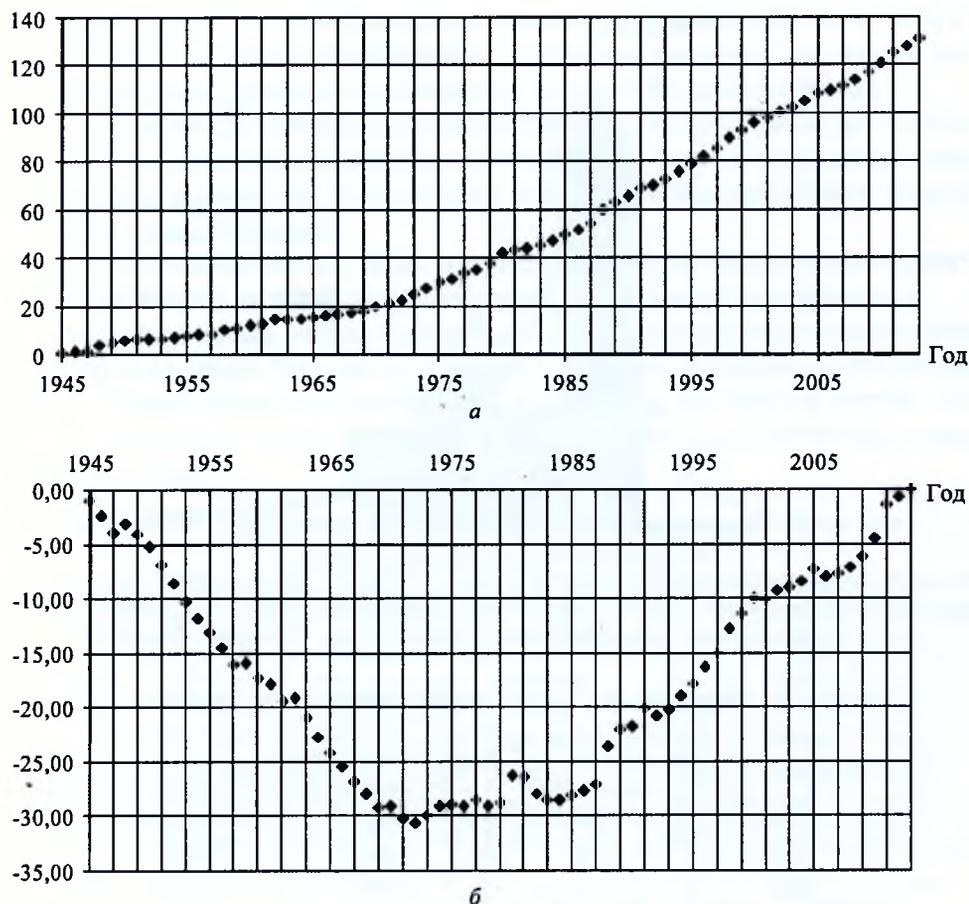


Рис. 2.18. Интегральная (а) и интегрально-разностная (б) кривые среднемесячных минимальных расходов р. Ясельда – г. Береза

Также по данным вышеуказанной табл. 2.21 экологический сток Ясельды с учетом вариации среднегодового стока ($C_v = 0,31$) принимается равным минимальному меженному стоку. Так как в действующем нормативном документе [153] не дается определение понятия «минимальный меженный сток», можно принять его как минимальный среднесуточный расход, который приведен в табл. 2.24.

Экологический сток в соответствии с формулой (2.14) и табл. 2.22 определяется как произведение минимального среднемесячного стока на коэффициент пропорциональности $K = 0,3$. В этом случае значение экологического стока несколько выше, чем по двум предыдущим методам.

В соответствии с действующими подходами в Республике Беларусь экологический сток составит $0,11 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом данный показатель не зависит от расчетной обеспеченности.

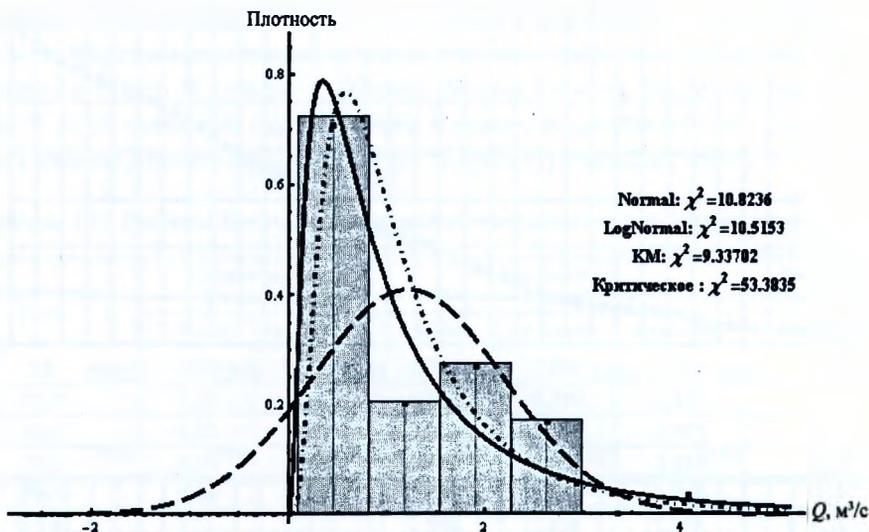


Рис. 2.19. Эмпирическая и теоретические кривые плотности распределения минимальных среднемесячных расходов. Закон распределения: штриховая линия – нормальный; штрихпунктирная линия – логнормальный; сплошная линия – Крицкого–Менкеля

Таблица 2.24. Экологический сток по методам минимальных расходов, м³/с

Обеспеченность, %-ная	Минимальные расходы воды		
	среднемесячные	среднесуточные	экологические
5,0	2,97	2,56	0,52
25,0	1,20	0,99	0,20
50,0	0,64	0,49	0,10
75,0	0,33	0,22	0,05
90,0	0,19	0,09	0,02
95,0	0,14	0,05	0,01
97,0	0,11	0,02	0,00

На основании используемой в Швейцарии зависимости (2.15) экологический сток в створе водохранилища 0,86 м³/с и в створе г. Березы равен 1,13 м³/с.

Рассмотренные подходы определения экологического стока регламентируют только минимальное значение стока реки. При этом отсутствует изменчивость стока по годам. Данный подход рекомендуется использовать в качестве контроля снижений экологического стока, вычисленного с использованием иных способов.

Рассматривая более простую реализацию способа переноса обеспеченностей [173], при котором принимаются следующие переходы – $Q_{\text{эко}}^{50} \geq Q_{\text{мес}}^{75}$, $Q_{\text{эко}}^{75} \geq Q_{\text{мес}}^{95}$, $Q_{\text{эко}}^{95} \geq Q_{\text{мес}}^{99}$, получены значения экологического стока для трех основных расчетных обеспеченностей (табл. 2.25). Кроме переноса значения обеспеченного расхода перенесена внутригодовая структура стока реки. Внут-

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

ригодовая структура стока реки очень важна при управлении водохранилищем сезонно-годового регулирования. В качестве гипотезы для оценки внутригодового распределения использовали следующие предположения.

1. По данным различных исследователей [28], внутригодовое распределение стока рек Беларуси в последние десятилетия не имеет значительных изменений. Для рек, имеющих в своих руслах водохранилища, наблюдается изменение стока между сезонами.

2. Период до введения в эксплуатацию вдхр. Селец можно рассматривать в качестве аналога при оценке структуры внутригодового распределения.

С использованием метода компоновки сезонов определено внутригодовое распределение стока Ясельды по створам д. Хорева и г. Березы. При этом выявлены незначительные отличия в структуре стока по данным постам. Это в основном связано с наличием пропусков и меньшей длины временного ряда по створу д. Хорева.

Таблица 2.25. Экологический сток, определенный по методу переноса обеспеченностей, м³/с

Месяц	Обеспеченность, %-ная			Месяц	Обеспеченность, %-ная		
	50,0	75,0	95,0		50,0	75,0	95,0
Март	8,00	6,86	5,82	Октябрь	0,744	0,338	0,287
Апрель	12,3	10,53	8,94	Ноябрь	1,23	0,533	0,452
Май	3,74	3,18	2,70	Декабрь	1,82	0,980	0,84
Июнь	1,24	0,575	0,488	Январь	1,08	0,580	0,492
Июль	0,88	0,402	0,341	Февраль	0,650	0,321	0,272
Август	0,481	0,195	0,166	Год	2,71	2,06	1,74
Сентябрь	0,311	0,153	0,130	—	—	—	—

Как указывалось выше, применение полноценного способа переноса обеспеченностей (оценка параметров функции распределения) по двум точкам приводит к значительным расхождениям в результатах. При этом сильно влияет на результат структура временного ряда, поэтому предложено использовать три точки для оценки параметров функции распределения. Возможны два близких варианта выбора перехода обеспеченностей:

25,0 % → 5,0 %, 50,0 % → 25,0 %, 99,0 % → 95,0 %;

25,0 % → 5,0 %, 75,0 % → 50,0 %, 99,0 % → 95,0 %.

Первый вариант ближе к методу перехода, предложенному в работе [199], только с добавлением одной точки 25,0 % → 5,0 %. Второй вариант составлен в большей степени интуитивно, но при этом базируется на подходах, описанных выше.

Годовой сток рассмотрен за период с 1945 по 2013 г. по створу г. Березы. Как и в случае с минимальным месячным стоком, наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого–Менкеля.

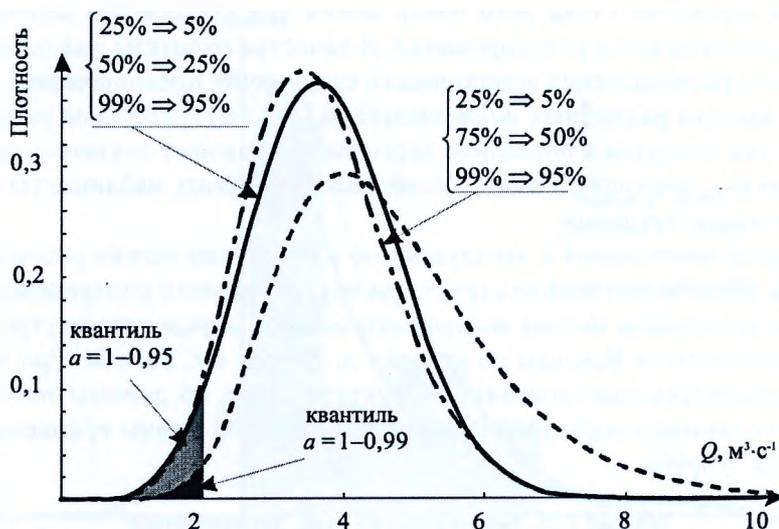


Рис. 2.20. Кривые плотности распределения среднегодового стока (штриховая) и экологического стока (штрихпунктирная и сплошная)

Аналогичное уравнение составляется и для второго варианта переноса обеспеченностей. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока. Как видно из рис. 2.20, для экологического стока кривая несколько сместилась влево и приобрела вид, близкий к нормальному закону распределения. Кроме этого, используемые два варианта переноса обеспеченностей дали сходные результаты.

Результаты оценки экологического стока представлены в табл. 2.26 и на общем графике (рис. 2.21). Для этого рассмотрим обеспеченность стока 75,0 % как наиболее часто используемую при проектировании водохозяйственных объектов.

Рассмотрев различные методы оценки экологического стока, проанализировав основные требования, предъявляемые к его величине, и вычислив на их основе минимального экологически обоснованного стока Ясельды, выявлено значительное расхождение в результатах. Расхождения в первую очередь связаны с различиями в предпосылках каждого метода, а также в экономических и социальных условиях, при которых они формировались.

Методики оценки, используемые в Беларуси и Украине, дали практически одинаковые результаты, что свидетельствует о формировании их в близких экономических условиях и научных подходах. Методы минимальных расходов дали значительно отличающиеся результаты, хотя в их основу заложены схожие принципы (вариации стока, класс реки). Так, метод минимальных расходов (ряд 7) определил экологический сток в сентябре даже выше, чем естественный сток Ясельды в данном месяце. Подход, применяемый в Швейцарии, определил объем экологического стока в размере около 32,0 % от естественного

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

Таблица 2.26. Сводная таблица оценки экологического стока Ясельды различными методами, м³/с

Месяц	Естественный сток	Перенос обеспеченностей		Метод, применяемый			Минимальных расходов	
		упрощенный метод	непосредственно метод	в Швейцарии	в Беларуси	в Украине	коэффициент вариации	20,0 % минимального суточного расхода
		ряд 1	ряд 2	ряд 3	ряд 4	ряд 5	ряд 6	ряд 7
3	9,02	6,86	7,59	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
4	13,85	10,53	11,65	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
5	4,18	3,18	3,52	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
6	0,76	0,58	0,64	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
7	0,53	0,40	0,44	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
8	0,26	0,20	0,22	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
9	0,20	0,15	0,17	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
10	0,44	0,34	0,37	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
11	0,70	0,53	0,59	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
12	1,29	0,98	1,08	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
1	0,76	0,58	0,64	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
2	0,42	0,32	0,36	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
Год	2,71	2,06	2,28	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05

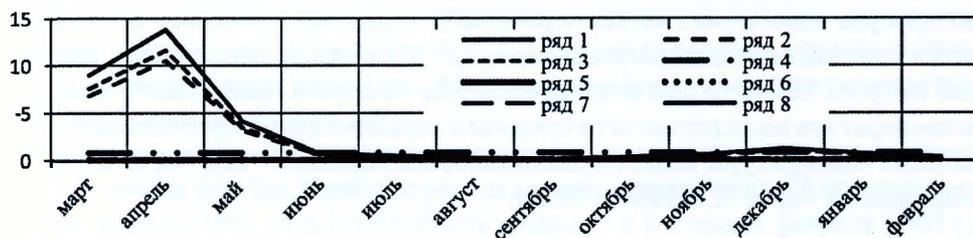


Рис. 2.21. Гидрограф естественного стока и варианты гидрографа экологического стока. Ряды те же, что и в табл. 2.26

стока реки, т. е. примерно треть всего объема стока должна поступать в нижний бьеф водохранилища.

Наиболее перспективной является методика переноса обеспеченностей, так как обладает возможностью внутригодовой изменчивости экологического стока. В данном случае полученные этим методом результаты могут быть рекомендованы к использованию при составлении (уточнении) водохозяйственного баланса в бассейне Ясельды. Однако применяемые переходы носят субъективный характер и требуют эколого-экономического обоснования для различных естественных условий. При этом может быть локальное зонирование параметров переноса обеспеченностей в зависимости от естественных условий реки, уровня развития промышленности, уровня трансформации ландшафтов, исторической или социальной значимости района.