



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему: **«Гидравлические сопротивления движению**
потоков в руслах с поймами
(на примере рек Ленинградской области)»

Исполнитель: Андрианов Е.В.
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель: доктор географических наук, профессор
(учёная степень, учёное звание)

Барышников Н.Б.
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(учёная степень, учёное звание)

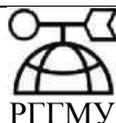
Исаев Д. И.

(фамилия, имя, отчество)

2017 г.

Санкт – Петербург

2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Гидравлические сопротивления движению
потоках в руслах с поймами
(на примере рек Ленинградской области)»

Исполнитель: Андрианов Е.В.
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель: доктор географических наук, профессор
(учёная степень, учёное звание)

Барышников Н.Б.
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(учёная степень, учёное звание)

Исаев Д. И.
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт – Петербург
2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Физико – географическое описание исследуемого района	7
1.1 Климатическая характеристика	7
1.1.1 Радиационный баланс	7
1.1.2 Температура воздуха	7
1.1.3 Влажность воздуха	11
1.1.4 Осадки	12
1.1.5 Скорость и направление ветра	16
1.1.6 Снежный покров	18
1.1.7 Испарение с суши	19
1.2 Общая характеристика водного режима	19
2 Происхождение и классификация пойм	26
2.1 Происхождение пойм	26
2.1.1 Концепции И.В. Попова и Р.С. Чалова	28
2.1.2 Концепция Е. В. Шанцера	29
2.1.3 Концепция В.В. Ламакина	31
2.1.4 Концепция С.С. Соболева и Г.Ф. Мирчинка	32
2.1.5 Концепции ГГИ и МГУ	34
2.2 Классификация и типизация пойм	38
3 Гидравлика пойм	46
3.1 Многообразие аспектов проблемы гидравлики пойм. Связь гидравлики и морфологии пойм	46
3.2 Доля пойменной составляющей в общем паводочном стоке рек	50
3.3 Пропускная способность русел с поймами	53
3.4 Способы расчета коэффициентов Шези и коэффициентов шероховатости в пойменных руслах	56
3.5 Взаимодействие руслового и пойменного потоков	60

3.5.1	Учет эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчете пропускной способности русел с поймами	65
4	Анализ исходных данных и построение расчетных зависимостей	68
4.1	Исходные данные	68
4.1.1	Описание рек на участке измерений	69
4.2	Анализ результатов сравнения расчетных значений коэффициента шероховатости с табличными	78
4.3	Вес пойменной составляющей в общем расходе воды	83
4.4	Анализ кривых зависимостей $\frac{n_p}{n_{pb}} = f(H')$; $\frac{n_{п}}{n_{pb}} = f(H')$ и $\frac{I}{I_{pb}} = f(H')$	86
4.5	Анализ деформаций полей скоростей	88
4.5.1	Деформация полей скоростей в русловой части потока под влиянием пойменного	88
4.5.2	Изменение пойменных скоростей под влиянием руслового потока	94
	Заключение	95
	Список использованных источников	98

ВВЕДЕНИЕ

Значение пойм для развития различных отраслей хозяйственной деятельности человека очень велико. Обилие чистой пресной воды, рыбы, высокопродуктивных лугов, возможность развития сельского хозяйства на богатых пойменных землях, удобные транспортные магистрали – всё это привело к быстрому освоению и заселению пойменных участков. Этот процесс происходил, несмотря на довольно частые катастрофические затопления пойм паводочными водами.

Интенсивное гидротехническое и другое хозяйственное использование рек оказывает существенное влияние на поймы. Особенно велико воздействие созданных на реках крупных водохранилищ, осуществляющих сезонное и многолетнее регулирование стока рек. Так, по данным исследователей, из 10 млн га затопленных на территории бывшего СССР угодий более 4 млн приходится на пойменные луга.

Существенно изменяются условия затопления поймы, расположенных в нижних бьефах водохранилищ из-за регулирования паводочного стока. Это приводит к резкому ухудшению их сельскохозяйственной продуктивности и к необходимости искусственного затопления специальными попусками.

Резко искажается ход русловых процессов в нижних бьефах таких сооружений. Регулирование стока наносов водохранилищами вызывает однонаправленные деформации русел в нижних бьефах сооружений на значительных расстояниях.

Существенное влияние на русловые процессы и развитие пойм оказывают путевые работы на реках, выполняемые для улучшения их судоходных условий. Интенсивное дноуглубление увеличивает глубины на перекатах, тем самым увеличивая пропускную способность русел, снижает уровни затопления пойм.

В последние годы происходит резкая интенсификация использования пойм в народном хозяйстве. Это, в первую очередь, сельскохозяйственное использование пойм и их использование при строительстве шоссейных и железных дорог, трубопроводов, линий электропередач и различных видов водозаборных сооружений на руслах рек.

Таким образом, большинство гидротехнических мероприятий, проводимых человеком, оказывает существенное влияние на естественные процессы формирования и развития пойм, искажает их, а иногда и приводит к нежелательным результатам.

Интенсификация использования пойм в интересах народного хозяйства приводит к резкому увеличению внимания к поймам со стороны исследователей, работающих в различных областях науки и техники: геологии и геоморфологии, ботаники, почвоведении, биологии, сельскохозяйственных исследований и др.

В то же самое время пойма – это неотъемлемая часть реки, продукт её жизнедеятельности, неразрывно с ней связанная и по-разному оказывающая влияние на речное русло в различные фазы гидрологического года. Особенно велика роль поймы при пропуске паводков на реках. Поэтому пойма – объект гидрологический и именно гидрологам должна принадлежать ведущая роль в изучении исследования процесса формирования поймы, процессов, происходящих на пойме и взаимодействия потоков поймы с русловыми потоками.

Изучение пойменных процессов, как и самих пойм, развивалось по двум направлениям.

Первое направление – гидроморфологическое описание процесса формирования, происхождения и типизации пойм. Наиболее полно это направление изложено в работах сотрудников ГГИ, осуществлявшихся под общим руководством Н.Е. Кондратьева и И.В. Попова.

Второе направления посвящено гидравлике пойм и, в свою очередь, в нём можно выделить несколько проблем, изучающих различные его аспекты. Так,

например, развито исследование влияния пойм на движение волны попусков и паводков. Пойма рассматривается как естественный регулятор, аккумулирующий значительные объемы воды в период максимумов половодья и постепенно сбрасывающий их в последующий перевод.

Из всех многообразных аспектов пойменных процессов, наиболее важными, является, проблемы расчёта ее пропускной способности. К сожалению, эта проблема еще далека от решения, к тому же, измерения расходов воды на пойме является трудной задачей. Измерения эти не всегда достаточного качества, а уклоны на пойме практически никем, за исключением специальных наблюдений, не измеряются.

Нами, на примеры данных 5 рек Ленинградской области, выполнен анализ полевых материалов с целью уточнения расчётных таблиц коэффициентов шероховатости.

С целью разработки рекомендаций по усовершенствованию методов расчёта расходов воды в сложносоставных руслах при наивысших уровнях воды был проведён анализ методов расчётов пойменной составляющей и оценка влияния пойменного потока на пропускную способность русла.

1 Физико – географическое описание исследуемого района

1.1 Климатическая характеристика

1.1.1 Радиационный баланс

Значение годового радиационного баланса изменяется в пределах 32 – 35 ккал/см², составляя 40 – 45% суммарной радиации. Период с положительным радиационным балансом длится от третьей декады марта до начала ноября. Наибольших значений радиационный баланс достигает в мае – июле, составляя 7,0 – 8,5 ккал/см², т. е. 50 – 60% суммарной радиации, наименьших в декабре январе 0,5 – 1,2 ккал/см². Сумма отрицательного радиационного баланса в среднем равна 2 – 3 ккал/см².

1.1.2 Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха на территории Северо-Запада колеблется от 2,0 °С в северо-восточной части до 4,5 °С в южной.

Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль. Средняя месячная январская температура Северо-Запада ниже -11 °С на северо-востоке.

Зима начинается в конце октября в восточной части Ленинградской области и во второй декаде ноября – в западной части Ленинградской области и характеризуется интенсивными и частыми вторжениями арктического воздуха. Первая половина зимы, или так называемое предзимье, характеризуется преобладанием ненастной погоды с выпадением дождя и мокрого снега. Обычно в конце октября – начале ноября появляется снежный покров, но он, как правило, держится недолго. В это время возможны неоднократные кратковременные образования снежного покрова. Приблизительно с половины декабря средняя суточная температура воздуха переходит через -5°С. На

большой части территории этот период длится до середины марта, т. е. в среднем 3 месяца.

Морозная погода и устойчивый снежный покров иногда устанавливаются в конце октября,

Абсолютный минимум температуры воздуха на территории Ленинградской области достигает -50 , -52 °С. Особенно значительные понижения температуры, ниже -50 °С отмечались в долинах рек Паши и Ояты. На остальной территории Северо-Запада абсолютный минимум составляет -48 °С. Минимумы температур приходятся на февраль. Средняя многолетняя температура самого холодного месяца (февраль) составляет $-8,5$ °С. Сведения о минимальных температурах воздуха представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Минимальная температура воздуха (°С)

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Минимальная средняя месячная температура воздуха, (°С)											
-8,0	-8,5	-4,2	+1,5	+7,0	+11,7	+15,0	+13,4	+8,8	+4,0	-1,8	-6,1
Абсолютная минимальная температура воздуха (°С)											
-35,9	-35,2	-29,9	-21,8	-6,6	+0,1	+4,9	+1,3	-3,1	-12,9	-22,2	-34,4
1883	1956	1883	1881	1885	1930	1968	1966	1976	1920	1890	1978

За начало весны принимается устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через нуль. Период с положительными средними суточными температурами составляет 190 – 200 дней. В Ленинградской области весна начинается в конце первой декады апреля. Между датами перехода температуры воздуха через нуль и разрушения устойчивого снежного покрова обычно проходит не более 7 – 10 дней. Весна характеризуется частыми возвратами холодов, а иногда и кратковременными установлениями снежного покрова. К концу апреля вся территория освобождается от снежного покрова.

Во второй половине апреля – в начале мае с выносом воздуха из южных широт на некоторое время может установиться летняя жара с температурой до

25°–30°С, а при вторжениях арктического воздуха, даже в конце мая - начале июня, наблюдаются заморозки.

Лето умеренно теплое, длится в среднем от начала июня до конца первой декады сентября. Максимальные среднемесячные и абсолютные максимумы температуры в районе исследований приходятся на июль. Средняя многолетняя температура воздуха в июле + 23,0°С. Абсолютный максимум температуры воздуха наблюдался в августе 2010 г. и составил + 37,1°С. Сведения о максимальных температурах в районе изысканий представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Максимальная температура воздуха (°С)

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Максимальная средняя месячная температура воздуха, (°С)											
-3,0	-3,0	+2,0	+9,3	+16,0	+20,0	+23,0	+20,8	+15,0	+8,6	+2,0	-1,5
Абсолютная максимальная температура воздуха (°С)											
+8,7	+10,2	+14,9	+25,3	+33,0	+34,6	+35,3	+37,1	+30,4	21,0	+12,3	+10,9
2007	1989	2007	2000	2014	1998	2010	2010	1992	1889	1967	2006

Осень наступает в Ленинградской областей в конце первой – начале второй декады сентября. Продолжительность осени около двух месяцев.

Среднегодовая температура воздуха в районе исследования за многолетний период составляет +4,4°С. Климатическая норма температуры воздуха за период с 1981–2010 гг. составляет +5,8°С. Сведения о среднемесячных и среднегодовых температурах воздуха представлены в таблице 1.3.

Средняя многолетняя температура воздуха понижается от +11,0°С в сентябре и до -0,6°С – в ноябре.

Продолжительность теплого периода в районе исследования составляет в среднем 250 суток (Таблица).

Таблица 1.3 – Средняя месячная и годовая температура воздуха (°С)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Многолетний период												
-7,6	-7,6	-3,6	+3,0	+9,6	+15,0	+17,8	+16,1	+11,0	+5,1	-0,6	-5,1	+4,4
Климатическая норма за период 1961-1990 гг.												
-7,8	-6,9	-2,2	+4,0	+10,9	+15,6	+17,7	+16,2	+11,1	+5,7	+0,1	-4,6	+5,0
Климатическая норма за период 1971-2000 гг.												
-6,1	-6,0	-1,4	+4,4	+10,9	+15,8	+18,1	+16,4	+11,0	+5,6	-0,1	-3,9	+5,4
Климатическая норма за период 1981-2010 гг.												
-5,5	-5,8	-1,3	+5,1	+11,3	+15,7	+18,8	+16,9	+11,6	+6,2	+0,1	-3,7	+5,8

Таблица 1.4 – Даты перехода средних суточных температур воздуха через 0° и 5°С

Начало			Окончание			Продолжительность (дни)		
Средняя	Самая ранняя	Самая поздняя	Средняя	Самая ранняя	Самая поздняя	Средняя	Самая ранняя	Самая поздняя
17/III	26/I	16/IV	22/X	24/X	29/XII	250	206	299

Суточная амплитуда колебания воздуха в районе исследования в среднем за год составляет 7,3°С. Амплитуда суточного хода температуры в зимние месяцы (5,7°–6,3°С) меньше, чем в летние (8,1°–8,6°С). Сведения о средней амплитуде суточного хода температуры воздуха представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Средняя амплитуда суточного хода температуры воздуха (°С)

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Амплитуда за средний многолетний период											
5	6	7	8	9	9	9	8	7	5	4	4
Максимальная наблюдаемая амплитуда											
20,4	22,4	18,7	20,1	19,4	19,2	16,5	16,6	15,0	21,0	16,0	19,6
Минимальная наблюдаемая амплитуда											
3,2	3,1	2,4	1,9	2,2	2,0	1,6	1,4	1,6	1,7	2,0	2,7

1.1.3 Влажность воздуха

Упругость водяного пара наименьших значений достигает в феврале (2,4 – 2,8 мб). Начиная с марта происходит увеличение влагосодержания воздуха, особенно интенсивное от мая к июню и от июня к июлю (на 3 – 4 мб). Максимального значения упругость водяного пара достигает в июле (12 – 14 мб). В августе влажность начинает понижаться в среднем на 0,4 – 0,6 мб, а в сентябре и октябре на 3 – 4 мб.

Максимальное значение относительной влажности воздуха наблюдается в ноябре – январе. В это время приход солнечного тепла минимальный, испарение мало, и относительная влажность в течение суток держится выше 85 %. Начиная с февраля – марта значения ее в дневные часы довольно интенсивно уменьшаются. Однако даже в период минимума (май – июнь) величины относительной влажности не опускаются ниже 50 – 55%. Над крупными водоемами влажность не опускается ниже 71 – 75%.

Число дней с относительной влажностью 80 % на Северо-Западе колеблется от 130 до 165.

Дефицит влажности наименьшие значения имеет в холодное время года. Особенно мал недостаток насыщения в декабре – феврале (менее 0,5 мб). С марта он постепенно увеличивается, достигая максимальных значений (5 – 7 мб) в июне. В районах, прилегающих к крупным водоемам, дефицит влажности составляет 4 – 5 мб.

Средняя годовая влажность воздуха исследуемом районе составляет в среднем 78%. Минимальные значения средней месячной относительной влажности воздуха отмечаются в мае и составляют 65%, а максимальные – в ноябре-декабре и составляют 87%. Сведения о среднемесечной и годовой относительной влажности воздуха представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Относительная влажность воздуха (%)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
86	84	78	71	65	68	72	77	81	83	87	87	78

1.1.4 Осадки

Исследуемая территория относится к зоне избыточного увлажнения. Это объясняется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой здесь циклонической деятельностью, которая активно проявляется во все сезоны года.

На распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и подстилающая поверхность, ведущие к нарушению плавного характера изменения осадков. Даже небольшие возвышенности обуславливают перераспределение осадков: увеличение их на наветренных возвышенных участках и уменьшение на подветренных склонах и в понижениях за возвышенностями. Заметно уменьшаются осадки вблизи крупных водоемов.

В среднем в год на большей части рассматриваемых районов выпадает 550 – 750 мм осадков. Годовое количество их возрастает в направлении с юго-запада на северо-восток. В районах, прилегающих к Ладожскому и Онежскому озерам, годовая сумма осадков не превышает 600 – 650 мм.

Внутри года осадки распределяются неравномерно. Характер их распределения по территории в теплый и холодный период имеет много общего с годовым, однако в теплый период года влияние возвышенностей на перераспределение осадков более заметно, нежели в холодный. Количество осадков за теплый период (апрель – октябрь) колеблется от 450 до 550 мм.

Осадки холодного периода (ноябрь – март) составляют примерно 40 – 45% годовых. За холодный период 150 – 200 мм осадков.

Максимум количества осадков на большей части территории приходится на июль – август. В эти месяцы выпадает от 70 мм до 80 – 90 мм.

Интенсивность выпадающих осадков, весьма различна. Наибольших значений они достигают в летние месяцы в июле и августе.

Сведения о многолетнем распределении осадков по месяцам представлены в таблице 1.7 Сведения о характерных значениях атмосферных осадков представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.7 – Атмосферные осадки (мм)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Многолетний период												
40	32	36	35	43	66	80	79	65	69	56	49	647
Климатическая норма за период 1961–1990 гг.												
38	31	35	33	38	58	80	81	69	67	56	51	637
Климатическая норма за период 1971–2000 гг.												
41	31	35	33	38	64	78	77	67	65	56	49	634
Климатическая норма за период 1981–2010 гг.												
44	33	37	31	46	71	79	83	64	68	55	51	662

Таблица 1.8 – Атмосферные осадки. Характерные значения (мм)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Максимальное количество осадков за месяц, год												
82	92	90	99	127	199	166	197	190	150	118	112	861
2011	1990	1763	1764	2003	1742	1979	1869	1767	1984	2010	1981	2012
Максимальное количество осадков за сутки (сумма)												
23	23	26	29	56	44	69	76	34	37	31	28	76
1955	1990	1971	1991	1911	2004	2002	1947	1912	2003	2010	2009	1947

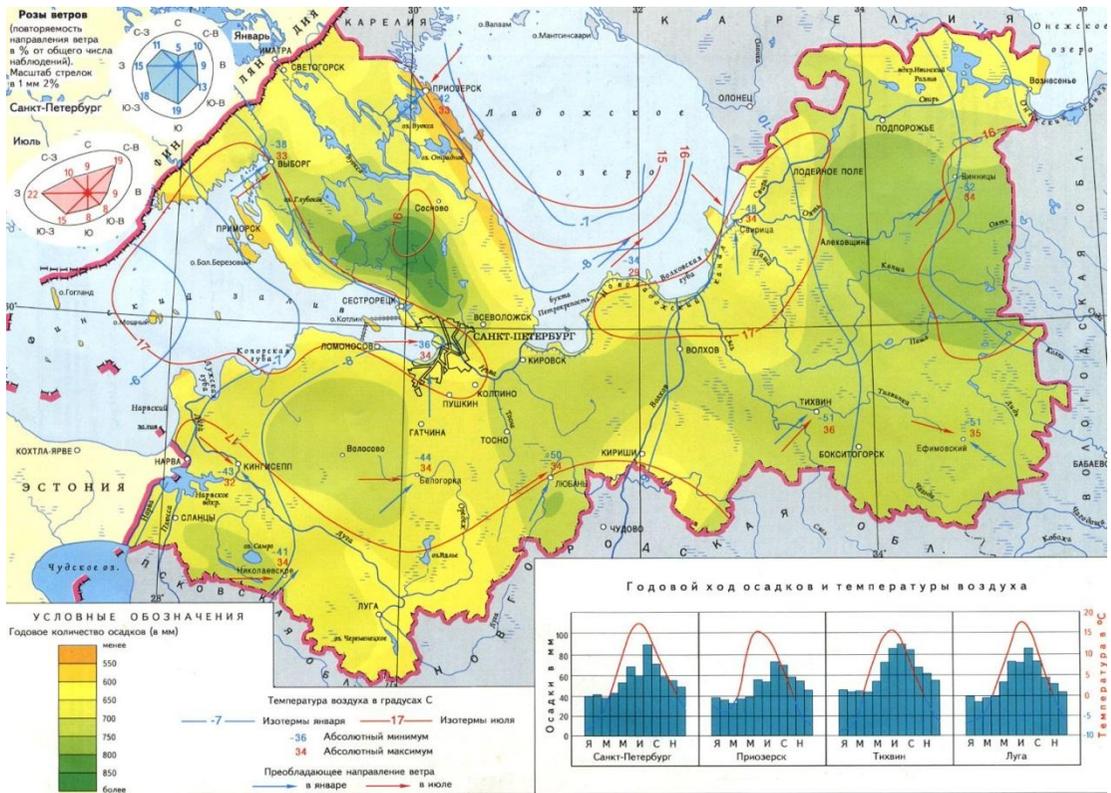


Рисунок 1.1 – Климатическая карта Ленинградской области

Абсолютный исторический суточный максимум осадков в теплый период год составляет 81,9 мм (1947 г.). Наибольшая интенсивность выпадения жидких осадков за 1-минутный интервал – 4,5–5,0 мм/мин. Среднее число дней с различным количеством осадков представлено в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Среднее число дней с различным количеством осадков (1966–2010 гг.)

Месяц, Год	Количество осадков, мм							
	0	≥0,1	≥0,5	≥1,0	≥5,0	≥10,0	≥20,0	≥30,0
I	1,76	20,81	14,11	10,28	2,01	0,27	0,03	0,00
II	1,60	17,32	12,32	9,29	1,81	0,26	0,01	0,00
III	1,39	14,32	10,77	8,25	1,77	0,41	0,01	0,00
IV	1,49	12,93	10,76	8,30	2,36	0,67	0,07	0,00
V	1,04	12,39	10,44	8,30	3,05	1,07	0,22	0,05
VI	0,83	13,61	11,88	10,11	4,32	1,77	0,35	0,1
VII	0,80	13,95	12,32	10,38	4,39	2,12	0,52	0,23
VIII	0,89	15,12	13,56	11,66	5,21	2,41	0,68	0,26
IX	1,06	16,37	14,06	11,69	4,63	1,76	0,23	0,06
X	1,38	17,19	14,64	11,86	4,11	1,30	0,13	0,00
XI	1,54	19,04	15,02	11,72	3,22	0,77	0,05	0,00
XII	1,75	20,98	15,68	11,79	2,43	0,49	0,00	0,00
Год	15,52	194,01	155,54	123,62	39,31	13,29	2,29	0,71

Сведения о числе дней с твердыми, жидкими и смешанными осадками представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Число дней с твердыми, смешанными и жидкими осадками

Вид осадков	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Твердые	17	17	10	3	0,2	0	0	0	0	2	9	17	75
Смешанные	8	5	7	5	1	0	0	0	0,1	3	7	7	43
Жидкие	2	2	4	9	15	18	17	17	19	17	9	3	132
Твердые	17	15	12	5	0,1	0	0	0	0,1	2	9	16	76
Смешанные	5	3	4	3	1	0,1	0	0	0	2	4	5	27
Жидкие	2	2	3	7	14	16	15	16	17	16	9	4	121

1.1.5 Скорость и направление ветра

В течении всего года в исследуемом районе доминируют ветры западного направления (Таблица 1.1). Повторяемость этого направления, как правило, превышает 50 %. При этом наиболее часто они отмечаются в холодный период года. В летние месяцы повторяемость ветров юго-западной четверти несколько уменьшается, северной – увеличивается. В холодный период, вследствие близкого расположения областей высокого и низкого давлений, возникают большие горизонтальные градиенты давления. Поэтому в это время ветры наиболее устойчивы по направлению и наибольшие по силе. Летом, в связи с уменьшением термических контрастов, барическое поле выражено менее четко, а градиенты давления незначительны. Ветры у поверхности земли ослабевают и становятся менее устойчивыми по направлению.

Под влиянием орографии преобладающее направление ветра искажается. Так, в долинах рек преобладают ветры, дующие вдоль долин. Еще в большей степени, чем направление, от местных условий зависит скорость ветра. Наименьшие скорости наблюдаются в районах, где сказывается влияние леса; по мере приближения к крупным водоемам скорость ветра возрастает, и наибольшие ее величины отмечаются на прибрежных и озерных станциях.

Наиболее сильные ветры наблюдаются, как правило, зимой и осенью. Среднегодовая скорость ветра составляет 2,3 м/с (

Таблица 1.2). Среднее число дней с сильным ветром (более 15 м/с) в год составляет 8,5, наибольшее – 28 (

Таблица 1.3). Значения наибольших скоростей ветра различной вероятности представлены в таблице 1.1.4. Ветровые нагрузки – в таблице 11.5. Роза ветров представлена на рисунке 1.2.

Таблица 1.1 – Повторяемость направления ветра и штилей по месяцам

Месяц	Повторяемость напр., %								Штиль
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
I	7	7	9	10	20	19	21	7	9
II	8	8	9	11	19	18	22	5	7
III	8	7	10	11	19	20	20	5	8
IV	12	13	12	9	12	16	20	6	9
V	16	14	11	6	9	16	22	6	11
VI	16	12	8	5	10	16	25	8	11
VII	14	10	9	6	13	17	23	8	14
VIII	13	9	8	7	13	18	23	9	15
IX	13	8	9	9	17	17	17	10	13
X	11	4	8	9	21	19	17	11	7
XI	9	4	10	11	23	20	14	9	4
XII	7	5	11	10	21	19	18	9	5
Год	11	8	9	9	17	18	20	8	9

Таблица 1.2 – Средняя месячная и годовая скорость ветра, м/с

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2,6	2,4	2,4	2,3	2,1	2,0	1,8	1,8	2,0	2,5	2,9	2,6	2,3

Таблица 1.3 – Число дней с сильным ветром (более 15 м/с)

	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Среднее	1,1	0,8	0,7	0,5	0,8	0,6	0,4	0,2	0,7	1,2	1,3	0,7	8,5
Наибольшее	5	5	3	3	4	2	2	2	4	7	8	4	28

Таблица 1.4 – Наибольшие скорости ветра различной вероятности

Скорость ветра, возможная один раз за...				
1 год	5 лет	10 лет	20 лет	50 лет
21	25	26	27	28

Таблица 1.5 – Ветровая нагрузка (кг/м²)

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
29,1	23,8	21,4	38,0	23,8	26,4	38,0	16,9	38,0	26,4	29,1	21,4

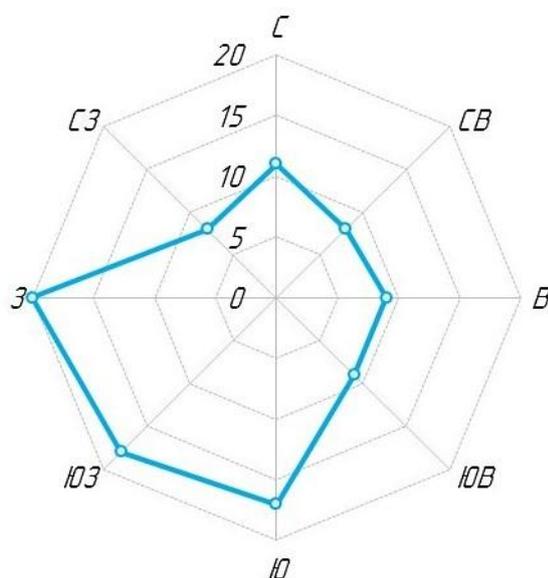


Рисунок 1.2 – Среднегодовая повторяемость (%) направлений ветра (Роза ветров)

1.1.6 Снежный покров

Первый снег в исследуемом районе выпадает обычно в первой половине октября. Но он, как правило, быстро тает. Снежный покров появляется в среднем в конце октября. Устойчивый снежный покров по данным образуется в начале декабря.

Снежный покров достигает наибольшей высоты к концу третьей декады февраля – началу первой декады марта. Максимальная его мощность по средним данным равна 33 см, наибольшая высота снежного покрова за зиму составляет 68 см.

Снежный покров держится в среднем 133 дня. Разрушение снежного покрова начинается в конце марта-начале апреля. Полностью снежный покров сходит к середине апреля.

Весеннее снеготаяние начинается в третьей декаде марта или начале апреля. Окончательный сход снежного покрова наблюдается в первой половине апреля.

Данные по высоте снега и числу дней со снежным покровом приведены в таблицах 1.16 – 1.18.

Таблица 1.16 – Средняя декадная высота снежного покрова по постоянной рейке (см), 1966–2008 гг

Месяц																		Наибольшие		
Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель			Сред н	Мак с	Ми н
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
—	—	—	8	1	—	1	1	—	2	2	—	2	2	—	—	—	—	33	68	12

Таблица 1.17 – Наибольшая месячная высота снежного покрова по постоянной рейке (см), 1971–2000 гг

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
51	61	50	3	0	0	0	0	0	2	9	29

Таблица 1.18 – Наибольшая месячная высота снежного покрова по постоянной рейке (см), 1971–2000 гг

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
51	55	44	3	0	0	0	0	0	2	9	29

1.1.7 Испарение с суши

Величина испарения является одним из основных расходных элементов водного баланса, на который затрачивается около 50 – 70% атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосборов.

Наибольшее испарение наблюдается в июле, наименьшее – в декабре. Типовое распределение испарения с суши (в процентах от годовой суммы) по месяцам представлено в таблице 1.19.

Таблица 1.19 – Испарение с суши (в процентах от годовой суммы) по месяцам

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,2	1,3	4,9	10,8	17,1	20,8	22,1	13,2	6,2	2,8	0,5	0,1

1.2 Общая характеристика водного режима

Все реки данного района принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. В годовом ходе уровня воды четко выражены четыре фазы: весенние половодье, летне-осенняя межень, почти ежегодно нарушаемая дождевыми паводками, затем короткий осенне-зимний период с несколько повышенной водностью рек, и, наконец, устанавливается зимняя межень, некоторые годы прерываемая подъемами уровней в периоды оттепелей; чаще подъем уровней вызван подпором от зажорных явлений.

Весеннее половодье. Весеннее половодье является важной фазой гидрологического режима рек рассматриваемого района, за время которого проходит в среднем от 40 до 60 % суммарного стока за год. Наибольшие расходы в году наблюдаются, как правило, в этот период.

Весеннее половодье в северо-восточных районах Северо-Запада начинается в конце первой, начале второй декады апреля. В отдельные годы в

зависимости от характера весны сроки начала половодья могут значительно отклоняться от средних многолетних.

Средняя продолжительность подъема половодья составляет 10 – 20 дней. В зависимости от характера весны продолжительность подъема весеннего половодья может изменяться от 5 до 52 дней. Средняя интенсивность подъема весеннего половодья по территории составляет 22 см/сутки, но в зависимости от дружности весны, особенностей местных условий она может колебаться в больших пределах, как по территории, так и от года к году.

В основном для рек Северо-Запада характерна одна волна половодья, форма гидрографа одновершинная. Однако большое влияние на форму гидрографа оказывают метеорологические условия в период формирования половодья. В поздние вёсны при дружном снеготаянии половодье наиболее высокое, в ранние мягкие вёсны происходит постепенное стаивание снега, половодье бывает обычно низкое.

В формировании весеннего половодья помимо талых вод участвуют дожди, доля которых в объеме половодья невелика (2 – 5 % суммарного стока). Основная доля стока половодья формируется талыми водами. Величина грунтового стока незначительна и составляет примерно 5 – 15 %.

Спад весеннего половодья, как правило, носит более затяжной характер. Средняя продолжительность его колеблется от 39 дней на малых реках, до 49 – на больших. При неблагоприятных условиях погоды спад может затягиваться до 60 – 69 дней. Наименьшая продолжительность 15 – 30 дней. Спад весеннего половодья всегда менее интенсивен; средняя величина колеблется от 6 см/сутки на малых реках до 12 см/сутки на больших. В отдельные дни величина эта может возрасть или падать.

Общая продолжительность весеннего половодья в среднем составляет 55 – 65 дней, наибольшая 89 – 105 дней, что главным образом зависит от длины реки, заболоченности и озерности водосбора.

Средние величины слоя весеннего стока колеблются в пределах 84 – 208 мм. При этом обнаруживается общее увеличение абсолютных величин

весеннего стока в направлении с юго-запада на северо-восток. Оно обусловлено распределением по территории запасов воды в снежном покрове, увеличивающихся также в направлении с юго-запада на северо-восток. Доля весеннего стока составляет 38 – 68 % годового стока. Средний слой стока за период половодья изменяется от 100 мм на юге до 170 – 180 мм на северо-востоке (бассейны рек Ояти, Паши).

Суммарный слой весеннего стока в основном определяется величиной поверхностного притока талых вод. Доля дождевого стока составляет примерно 2 – 5 % суммарного стока. Величина подземного стока в общем стоке весеннего половодья незначительна и составляет примерно 5 – 15 %. Она зависит главным образом от характера почво-грунтов, слагающих водосборы, от глубины вреза русла. В районах с песчаными почво-грунтами доля грунтового стока в общем стоке весеннего половодья составляет 10 – 15 %, в районах суглинистых почво-грунтов – от 3 до 8 %.

Летне-осенняя межень. Летне-осенняя межень обычно наступает в начале – середине июня и заканчивается в октябре.

При дружном прохождении весеннего половодья период низкого стока на реках может наступать значительно раньше, в середине мая, а в годы затяжного половодья или, когда на спаде его проходят дожди, – в середине или даже в конце июля. Наиболее позднее начало межени в последней декаде июня наблюдается на северо-востоке территории (бассейны рек Паши, Ояти). Средняя продолжительность летне-осенней межени изменяется от 64 до 130 дней. Обычно ее продолжительность на больших реках меньше, чем на средних и малых.

Наиболее маловодный период летне-осенней межени отмечается в июле, августе, реже в сентябре. Средняя продолжительность его для большинства рек 15 – 20 дней, наибольшая – до 70 дней. Для зарегулированных рек и рек с малыми водосборами до 50 км² средняя продолжительность увеличивается до 25 – 35 дней (наибольшая до 130 дней).

Летне-осенняя межень характеризуется незначительными колебаниями уровней.

Ежегодно межень нарушается дождевыми паводками. Дождевые паводки на реках Северо-Запада в теплый период года (май – октябрь, иногда ноябрь) наблюдаются ежегодно. Количество их в году колеблется от 1 – 2 до 3 – 4, а в отдельные годы до 5 – 6. Наиболее дождливыми месяцами являются август – октябрь. По величине максимальных расходов воды и слою стока дождевые паводки, как правило (в 73 % случаев от общего числа наблюдаемых), значительно меньше снеговых (весенних). В отдельные годы на некоторых реках (в 13 – 15 % случаев) они приближаются или почти достигают величины весеннего половодья; коэффициенты соотношения равны 0.80 – 0.99.

Слой стока по территории (исключая карстовый район Ижорской возвышенности) в летнюю межень колеблется от 20 до 60 мм. Осенью за счет осадков и уменьшения испарения с почвы, и водной поверхности меженный сток заметно повышается. Суммарная величина стока за летне-осенний сезон изменяется от 37 до 127 мм, при общем увеличении абсолютных величин стока с юго-запада на северо-восток. Доля летне-осеннего стока составляет 18 – 44 % годового стока.

Зимняя межень. Зимняя межень устанавливается в конце ноября – середине декабря; наиболее ранние даты приходятся на конец октября, начало ноября, наиболее поздние – на январь. Заканчивается зимняя межень с началом подъема весеннего половодья в среднем в конце марта – первой декаде апреля. Средняя продолжительность межени изменяется от 84 до 115 дней, увеличиваясь с юго-запада на северо-восток. Наибольшей прерывистостью и наименьшей продолжительностью межени характеризуются реки, впадающие в Финский залив, где в зимнее время наиболее часты оттепели. Средний расход за зимнюю межень превышает 30-дневный на 20 – 35 %.

Роль зимних паводков в режиме рек Северо-Запада невелика. Зимняя межень может в отдельные годы во время оттепелей прерываться повсеместно

паводками и состоять из двух – трех частей. По высоте они близки к паводкам летнего периода (соотношение их с весенними паводками составляет 0.4 – 0.5).

По форме гидрографа преобладают единичные (одновершинные) паводки, сформированные, как правило, ливневыми дождями. Иногда при многодневных обложных дождях они имеют многовершинную форму.

Более характерными для этих рек являются подъемы уровней воды за счет подпоров от зажоров, которые имеют место на большинстве рек, независимо от размеров последних. Повторяемость этих подъемов в многолетнем разрезе и в пределах одного года на разных реках различна. На таких реках как Охта, Сясь, Оять, Тихвинка, Луга, Великая и других подъемы уровней наблюдаются почти ежегодно, несколько реже они бывают на Паше, Воложке, Мсте, Ловати, Кунье и только в отдельные годы – на Шелони у г. Порхова, Узе у д. Дубской.

Наибольшие относительные величины зимнего стока (13.8 – 14.5 % годового) наблюдаются на реках с карстовым питанием (Воложка, Рагуша, Уверь). Наименьшая величина (9.0 %) получена для р.Ояти (у д.Мининкая), в верховьях которой также наблюдаются карстовые явления, но в данном случае карст, по-видимому, не оказывает в зимнюю межень положительного влияния на питание реки.

Величина среднего слоя стока за межень изменяется по территории от 2 до 70 мм, в среднем они равны 15 – 25 мм, что составляет по отношению к годовому 5 – 12 %. Наиболее маловодный период чаще всего наблюдается в феврале, марте. Средняя продолжительность его 15 – 20 дней (наибольшая до 70 дней).

2 Происхождение и классификация пойм

2.1 Происхождение пойм

Исследователи практически пришли к единому мнению о причинах образования современных речных пойм. Они считают, что поймы являются результатом эрозионно-аккумулятивной деятельности реки и формируются при смещении ее русла по дну долины. Вследствие этого поймы имеют сложное двухслойное строение. Нижняя их часть сложена из косослойно расположенных отложений, сформированных русловой фацией, а верхняя представляет собой горизонтально расположенные тонкозернистые слои – пойменные отложения (фации). Однако прежде чем эта концепция получила полное признание, исследователи прошли сложный путь, сопровождавшийся ценными открытиями, заблуждениями и существенными ошибками. Первыми работами, заложившими основы научного подхода к решению проблемы происхождения пойм, были исследования К.И. Рассела, А. Сюрреля, Д.У. Пауэлла и Г.К. Джилльберта, вскрывшие основные закономерности речной эрозии на примере рек Северной Америки (Миссисиппи, Колорадо и др.). Несколько позднее В.В. Докучаев изложил оригинальную концепцию, основанную на гипотезе озерного происхождения пойм в условиях Русской равнины. Научно обоснованно и наиболее близко к современному состоянию проблема происхождения речных пойм изложена в конце XIX века С.Н. Никитиным. Большой вклад в развитие учения о происхождении пойм внесли отечественные ученые В.Р. Вильямс, Р.А. Еленевский и особенно Е.В. Шанцер. Так, Шанцер одним из первых установил тесную зависимость между процессом формирования пойм и типом руслового процесса. Однако в то время учение о русловом процессе только начинало складываться в научную теорию, поэтому

Шанцером были приведены описания формирования лишь отдельных типов пойм.

Вопросам происхождения и развития пойм особенно много внимания уделялось в годы, предшествующие периоду перестройки, что было обусловлено возросшей интенсивностью их хозяйственного использования и внедрением новых, более совершенных методов исследования (аэрофотосъемка, стереофотометрические и космические методы, позволяющие охватывать обширные территории, занятые поймами, и изучать их развитие). Это позволило выполнять одновременные наблюдения за изменением рельефа, динамикой затопления и разгрузки пойм и другими процессами на поймах на участках большой протяженности. Проведение аэрогидрометрических работ и аэрофотосъемок в сочетании с наземными измерениями также дало толчок к созданию научно обоснованной теории русловых процессов и на ее основе к созданию теории формирования пойм. Эта теория, являющаяся составной частью теории русловых процессов, в свою очередь, дополняет ее и является стимулятором ее развития. Анализ данных натурных измерений и наблюдений показал, что процесс формирования различных типов пойм не является однородным, и привел к выводу о необходимости детализации этого вопроса. Если по вопросу эрозионно-аккумулятивного происхождения пойм взгляды практически всех исследователей не расходятся, то при оценке степени влияния отдельных факторов (эоловый, эрозионный, климатический и др.) расхождения весьма существенны. По-видимому, это является следствием недостаточного учета особенностей климатических условий. Действительно, в качестве примера можно привести результаты дискуссии по вопросу влияния эолового фактора на процесс формирования современных пойм. Так, В.Р. Вильямс и Н.И. Маккавеев [104] придают ему достаточно большое значение, в то же время И.В. Попов считает его вторичным. Видимо, роль эолового фактора значительно изменяется, увеличиваясь с севера на юг. В зоне избыточного увлажнения, особенно на реках с продолжительным половодьем, в условиях короткого летнего периода его влиянием на процессы формирования пойм можно

пренебречь. В аридной зоне ветровые переносы песка, формирующего дюны высотой в 10 м и более, столь значительны, что пренебрегать их влиянием нельзя. Важными являются вопросы формирования русловой и пойменной фаций аллювия на пойме. Практически все исследователи считают, что процесс формирования русловой фации на различных типах пойм существенно отличен. Так, Попов отмечает; «Рост поймы в плане осуществляется в результате образования береговых валов. Основой берегового вала, его фундаментом, является часть гребня крупной гряды в русле реки и формирующийся пляж на выпуклом берегу». Дальнейший процесс нарастания гребня вала в высоту происходит из-за растительности, которая способствует аккумуляции наносов.

2.1.1 Концепции И.В. Попова и Р.С. Чалова

Р.С. Чалов считает: «Образование поймы связано с развитием в русле аккумулятивных скоплений наносов (побочней, осередков), представляющих собой форму их перемещения. При изменении горизонтов воды от паводка (половодья) к межени отдельные части прирусловых отмелей выходят из воды и могут закрепляться растительностью. Наиболее высокие из них, сформировавшиеся в многоводные годы, не затопляются в последующее низкое половодье, что увеличивает вероятность их закрепления растительностью. Дальнейший процесс нарастания гребня происходит за счет аккумуляции наносов растительностью». Эти точки зрения близки между собой. Однако Попов за основу берегового вала принимает гряду на пляже, а Чалов – побочень или осередок. В то же время и побочень и осередок являются различными формами, точнее разновидностями ленточных гряд, однако не прилегающими к берегам и не формирующими пойму.

Большинство исследователей также сходятся во мнении, что особенности формирования пойм обусловлены особенностями руслового процесса на данном участке реки.

Пойменная фация аллювия – результат отложения мелкозернистых, взвешенных наносов на поверхностях пойм. Роль этой фации заключается в нивелировке, часто гривистой, поверхности пойм. Толщина слоя наилка зависит от концентрации этих наносов и скорости течения пойменных потоков, глубин затопления пойм, а также расстояния от мест их поступления (через прорвы или прирусловые валы) до мест отложения, продолжительности половодья и других факторов. Она изменяется от долей миллиметров до десятков сантиметров за половодье.

В послевоенный период трудами И.В. Попова, Н.И. Маккавеева и Р.С. Чалова теория происхождения и формирования пойм доведена до современного уровня. Детальные описания процесса формирования пойм при различных типах руслового процесса приведены именно в работах этих исследователей.

2.1.2 Концепция Е. В. Шанцера

Шанцер Е.В. отмечает: «Нормальная мощность аллювиальной свиты, отлагающейся на дне эрозионной речной долины, при условии неизменности климата и неподвижности земной коры должна приниматься близкой к разности высотных отметок двух уровней: средней отметки дна песков реки в данном сечении долины и средней отметки уровня воды во время паводка» (рис. 1.1).

Как видно на рис. 1.1, мощность аллювиальной свиты зависит от сред них уровней периода пропуска паводка. Расчеты, проведенные рядом исследователей, показывают, что на большинстве рек мощность аллювия обычно не достигает максимального значения. Это обусловлено тем, что за периоды, измеряемые не сколькими тысячелетиями, река, перемещаясь по долине, в ходе плановых деформаций русла несколько раз перемывает свой аллювий. Действительно, расчеты, выполненные для плёса Куйбышев-Камышин на р. Волге (до строительства ГЭС), показывают, что годовой прирост отметок поймы – за счет отложения наилка составляет 1-1,5 мм. Таким

образом, за 10 000 лет пойма должна достигнуть высоты 10-15 м, а фактически ее высота только 6-8 м.

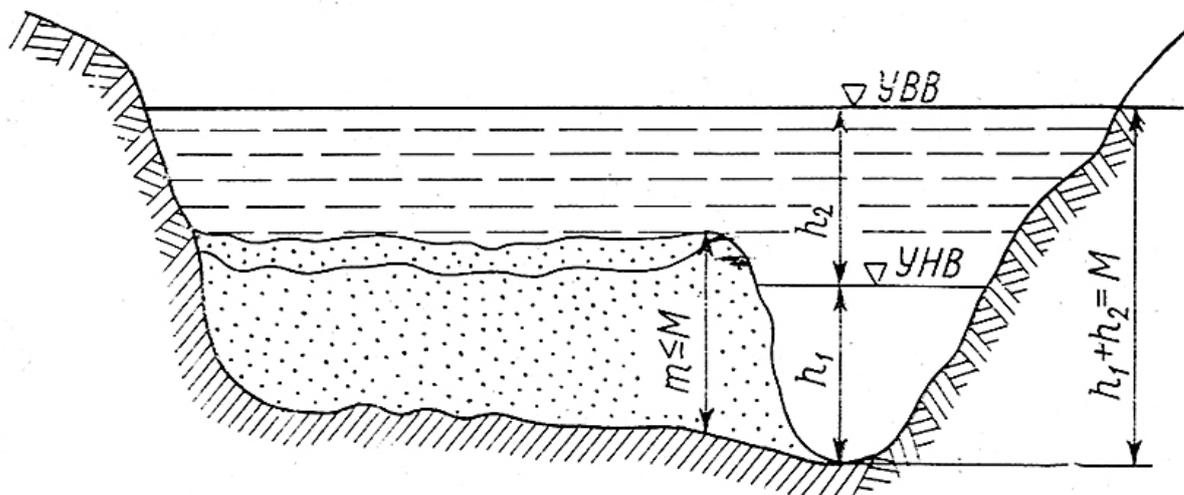


Рисунок 2.1 – Схема определения нормальной мощности аллювиальной свиты (по Е. В. Шанцеру). m – действительная мощность аллювия, M – максимально возможная (нормальная) мощность аллювия, h_1 – глубина реки в межень на плесе, h_2 – высота паводка.

Большое влияние на мощность аллювиальной свиты также оказывает и ряд дополнительных факторов (изменение климата, ледоход, ветер и др.). В частности, Шанцер отмечает работу плавучего льда в половодье, который как бы выпахивает аллювий на глубину до 0,2-0,3 м и переносит валуны и гальку на большие расстояния. Наиболее противоречивы мнения о влиянии изменений климата, ставших особенно актуальными в связи с его значительным потеплением на $(0,7 \pm 0,2^\circ)$ в последние годы, которые происходят в двух направлениях:

1) климат определяет количество и интенсивность выпадения осадков и величину испарения, а, следовательно, и водный режим реки, его средние и экстремальные характеристики, что приводит к изменению амплитуды колебания уровней и глубин реки, т. е. величин, определяющих мощность аллювия;

2) климат определяет ход процессов выветривания и характер растительного покрова, тем самым он определяет эрозию почв и поступление наносов в реки, что также непосредственно влияет на мощность аллювия. Оценив оба эти фактора на основании сравнения данных по рекам ЕТР, протекающим в различных климатических условиях, а также на основании анализа обширной гидрологической литературы, Шанцер пришел к выводу, что роль климата в пределах четвертичного периода обычно значительно преувеличивают. Нормальные отклонения мощности аллювиальной толщи от ее средних значений для равнинных рек под влиянием климата, по данным Шанцера, не превышают 15-35 %. Кроме этого, по мере повышения отметок поверхности поймы уменьшаются частота ее затопления и объемы выносимых на поверхность наносов.

2.1.3 Концепция В.В. Ламакина

В 1950 г. В.В. Ламакин высказал гипотезу о связи аллювиальных отложений с характером движения земной коры на отдельных участках. Суть гипотезы заключается в том, что в речных долинах наблюдается закономерное, обусловленное движением земной коры, чередование повышающихся и понижающихся участков. По данным Ламакина, между ними располагаются участки, иногда большой протяженности, находящиеся в равновесном состоянии. На поднимающихся участках наблюдается интенсивный врез русла реки. В паводочный период из-за больших скоростей течения на поймах, как правило, небольших размеров, откладывается только крупный аллювий (по сравнению с другими участками). Толщина слоя аллювия небольшая. Аллювий, по выражению Ламакина, выстилает дно долины (инстративный). Опускающиеся участки долины характеризуются интенсивным отложением аллювия, который, по выражению Ламакина, настиляет дно долины. Отсюда и название – настилающий, или констративный, тип аллювия. Скорости на пойме

невелики, что приводит к отложению относительно мелких по сравнению с предыдущим типом частиц.

Промежуточный (между двумя первыми) тип характеризуется отсутствием движений земной коры. Русло реки блуждает по долине и перестилает аллювий. Этот тип получил название перести лаемый, или перстративный. Каждому типу аллювиальных отложений соответствует тип поймы. Классификация Ламакина является оригинальной, но нуждается в доработке и более тщательной увязке с процессами образования пойм. Принципиально отличная точка зрения приведена Г.В. Обидиентовой, утверждающей, что речные террасы, в том числе и пойма, являются результатом руслового процесса, его неотемлемым следствием. Она отрицает возможность образования террас каким-либо иным путем, например, в результате тектонических движений. Формирование пойм происходит в основном вследствие смены маловодных и многоводных периодов. По этой причине ранее образовавшаяся пойма может оказаться погребенной под наносами при наступлении многоводного цикла.

2.1.4 Концепция С.С. Соболева и Г.Ф. Мирчинка

С.С. Соболев и Г.Ф. Мирчинк выдвигают концепцию о решающей роли климата в образовании террас и отдельных частей поймы. Наиболее интересным результатом работ этих авторов является вывод о закономерностях в строении аллювия и о зависимости типов пойм от гидрологического режима. В частности, Соболев считает, что строение вторых террас, сходное со строением пойм, является свидетельством их «пойменного» происхождения. Е.В. Шанцер в более поздних работах, по изучению аллювия, отмечает: «Аллювий стал одним из наиболее хорошо изученных генетических типов континентальных отложений вообще». Далее он уточняет его определение: «Аллювий включает отложения русловых водных потоков, текущих по дну созданных ими самими эрозионных долин и по поверхности также ими

создаваемых аллювиальных аккумулятивных равнин». В этом определении сконцентрирована идея Шанцера, заключающаяся в том, что аллювий – результат одновременной эрозионной и аккумулятивной работы реки. С учетом исследований Ламакина Шанцер рассматривает динамику формирования и развития аллювиальной свиты, учитывая влияние таких факторов, как активные движения земной коры и изменения климата. Развивая идеи, высказанные в работе 1951 г., он отмечает, что нормальная мощность аллювия крупных рек, изменяющаяся от 10-15 до 30 м, возникает благодаря совместному воздействию бокового смещения русла и периодически повторяющихся паводков при полной неизменности обстановки, в которой происходит накопление аллювия. Изменение фаций аллювия снизу-вверх ни в коей мере не свидетельствует об изменениях климата. Существенное влияние на формирование аллювия по нормальной схеме оказывает режим питания реки.

Следует отметить, что как в ранний период, так и в настоящее время публиковалось и публикуется большое количество региональных исследований, посвященных поймам различных рек. Эти региональные исследования связаны с широким использованием пойм в народном хозяйстве (сельское хозяйство, рыболовство, гидротехническое строительство, транспорт, ЛЭП и др.). К сожалению, обширная региональная литература страдает одним общим недостатком – отсутствием единой методики исследования, что значительно снижает ее научную ценность. Приведенные выше исследования выполнены морфологами, ботаниками и другими специалистами. Поэтому особый интерес представляют работы гидрологов, посвященные этой проблеме. Первые работы по происхождению и классификации пойм выполнены Б.В. Поляковым и М.А. Великановым. М.А. Великанов отмечал, что, поскольку значительная часть эрозионной работы рек происходит большую часть года, когда на реках наблюдается межень, необходимо наличие малого, или меженного, русла и большого русла (русла с поймой), действующего кратковременно и пропускающего паводочные расходы и «по большей части

мало влияющего на форму меженного русла». Пойма принимает участие в русловом процессе, «но краткость периода ее перекрытия, а главное обычно покрывающая ее растительность, создающая повышенные сопротивления паводочному стоку, делают участие поймы в образовании русла в большинстве случаев сравнительно слабым. Исключения составляют разные случаи, когда пойменный поток имеет направление, существенно отличное от меженного, и пересекает последний» [46, с. 27]. М.А. Великанов считал пойму разновидностью одного из шести выделенных им русловых образований равнинных рек, которым соответствуют и особые типы гидравлической структуры потока.

2.1.5 Концепции ГГИ и МГУ

В период, предшествующий перестройке, вопросами формирования и происхождения пойм занимались группы исследователей в МГУ под руководством Р.С. Чалова и в ГГИ под руководством И.В. Попова и Н.Е. Кондратьева. Кроме того, имелись группы или отдельные исследователи в различных научных организациях страны, также развивавшие это направление исследований.

Разработки ГГИ основаны на всестороннем подходе к проблеме русловых процессов, в частности пойм, с позиций ряда наук (геоморфологии, гидрологии и гидравлики). В них осуществлен очень важный переход к дискретным представлениям о русловых процессах, позволивший выделить в потоке шесть структурных уровней. Формирование пойм происходит при четвертом структурном уровне в первую очередь под воздействием руслового потока, разрабатывающего свою долину, и тесно связано с типами руслового процесса. В работах Попова получила дальнейшее развитие концепция Шанцера о двучленном характере строения пойм. Отметив, что обычная, нормальная схема строения поймы отвечает условиям залегания крупного руслового аллювия в основании поймы с убыванием крупности частиц к поверхности, Попов

выполнил анализ возможных случаев отклонения от этой схемы. В качестве факторов, вызывающих нарушения нормальной схемы, он приводит климатические и геологические условия. На основании анализа материалов выделяются реликтовые, остаточные образования.

Таким образом, в формировании рельефа пойм основным является русловой аллювий, формирующий постепенно смещающиеся в сторону вогнутого берега русловые валы. В связи с колебаниями водности, объемов стока наносов и другими факторами формирование русловых валов происходит за различные периоды времени и связано с размывом противоположного вогнутого берега. Именно русловые валы определяют гребистый рельеф пойм (при соответствующих типах руслового процесса, меандрировании и фуркации). Время формирования русловых валов колеблется в весьма широких пределах – от 1-2-х до нескольких десятков лет.

Диаметрально противоположную функцию в формировании рельефа пойм занимает пойменная фация. Пойменный аллювий образуется из мелкозернистых взвешенных наносов, отлагающихся на пойме в виде наилка, и сглаживает пойменный рельеф. Учитывая, что мощность пойменной фации аллювия достигает 3-5 м и более, он может в значительной степени сгладить первоначальный рельеф поймы.

В качестве основных факторов, нарушающих нормальную мощность аллювия, можно привести следующие:

- 1) интенсивность плановых деформаций речного русла, определяемая уклоном дна долины. При интенсивных плановых деформациях, имеющих циклический характер, и отсутствии факторов, препятствующих развитию полного цикла излучин, но ограничивающих длительное однонаправленное смещение русла, поток может неоднократно перемывать современную пойму. Это приводит к резкому уменьшению продолжительности формирования поймы, т.е. к уменьшению времени накопления наилка, а следовательно, и общему уменьшению мощности поймы;

2) состав, крупность и режим поступления транспортируемых потоком наносов;

3) наличие условий, ограничивающих плановые деформации;

4) существенное влияние оказывают изменения климата, наблюдающиеся в последние годы. Они приводят к значительному изменению количества выпадающих осадков, испарения и других факторов, что может приводить к значительному изменению процессов формирования пойм.

В качестве дополнительных факторов можно привести тектонические движения, заторы и зажоры, болотообразовательные процессы, многолетнюю мерзлоту, делювиальные выносы и др.

Таким образом, в основу теории формирования пойм Поповым положена концепция, разработанная Шанцером и развитая Поповым на основе созданной в ГГИ теории руслового процесса.

Основным моментом теории формирования пойм является положение о том, что пойма – продукт жизнедеятельности реки, результат перемещения русла по долине – имеет двучленное строение и определяется типом руслового процесса, присущего данной реке, точнее участку реки. Основными факторами определяющими русловой, а следовательно, и пойменный процессы, являются особенности водного режима, сток наносов и физико-географические условия (геологическое строение долин и др.).

Наиболее крупные исследования за последние 60 лет были выполнены в МГУ. Так, Н.И. Маккавеев наметил основные принципиальные

положения разрабатываемой теории, в последствие доработанные и окончательно сформулированные в более поздних работах. Н.И. Маккавеев отмечает, что пойма, будучи морфологически схожей с террасой существенно отличается от последней тем, что находится в сфере, хотя и эпизодического, но непосредственного воздействия речного потока; поверхность поймы является либо ареной аккумуляции речных наносов, принесенных тальми водами, либо те же воды эродируют ее. Пойма образуется почти на всех реках, имеющих значительные колебания уровня воды. Она отсутствует только на порожисто-

водопадных участках, в узких ущельях, где скалы и осыпи вплотную подходят к руслу, и на зарегулированных реках с большой степенью регулирования. К этому следует добавить озерные реки, типичным примером которых являются реки Нева, Свирь и Святого Лаврентия. Развивая идеи В.В. Докучаева, Н.И. Маккавеев отмечает, что ширина поймы изменяется по длине реки; крупные расширения дна долины чередуются с теснинами. План поймы обычно четковидный. Отмечается ярко выраженная зависимость между амплитудой колебания уровня и относительной шириной поймы при прочих равных условиях.

Относительная ширина пойм крупных рек с малой амплитудой колебания уровня обычно меньше, чем малых рек с большей амплитудой колебания уровня воды. Между руслом и поймой происходит непрерывный обмен наносами: с одной стороны, происходит подмыв яров и эрозия поверхности пойм, а с другой, большое количество наносов, преимущественно в виде наилка, оседает на пойме в период половодья. Объем наносов, участвующих в этом обмене, обычно превышает объем транзитного стока наносов. В ряде своих работ Маккавеев, как и Вильямс, подразделяет пойму на прирусловую, центральную и притеррасную. Для равнинных рек умеренного пояса по гидрологическому режиму он выделяет пять фаз воздействия потока на пойму. Дополнительными факторами являются ледоход, ветер, болотная растительность и многолетнемерзлые грунты. Влияние ледохода на пойму значительно сказывается в основном на севере и в Сибири. Влияние ветра, наоборот, сильно ощущается в районах с засушливой летней меженью и песчаным аллювием.

Идеальная пойма равнинной реки (по Маккавееву), начиная с поверхности и от русла, имеет следующее строение, выраженное фаціальными видами пойменных осадков:

- а) фация прирусловой поймы – крупные пески мощностью до 2-3 м;

б) фация центральной поймы – тонкие пески, супеси, легкие горизонтально-слоистые суглинки; толщина слоев от 1-2 мм до 2-3 см, общая мощность от 1-2 до 10-15 м;

в) фации заводей и притеррасной поймы – преимущественно тонкослоистые илы. Часты вкрапления растительных осадков;

г) фация руслового аллювия;

д) спорадически встречающиеся отложения старичной фации.

Направление, развиваемое в ГГИ в работах И.В. Попова, Н.Е. Кондратьева и их учеников, также основано на концепциях Е.С. Шанцера. Но здесь четко обосновано положение о дискретности руслового процесса, о связи типов пойм с типами руслового процесса. Главным в этом направлении является теоретическое обоснование связи типов пойм с типами русловых процессов, а также большое прикладное и практическое значение их классификации, широко используемой в ряде проектных организаций при водохозяйственном проектировании.

Направление, разрабатываемое в МГУ под руководством Р.С. Чалова, является оригинальным, оно основано не только на теории русловых процессов, но и на обширных полевых данных, и охватывает как равнинные, так и горные реки. Все три направления в разработке теории происхождения пойм основаны на работах исследователей раннего периода и являются их закономерным продолжением.

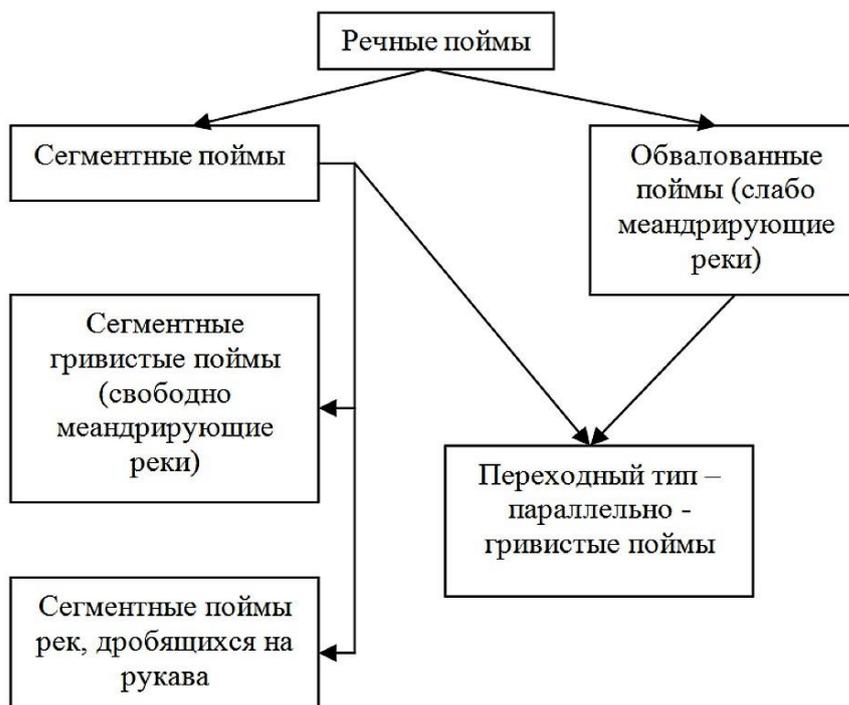
В указанных трех основных направлениях много общих, правильно отмеченных и проанализированных закономерностей, позволяющих уже сейчас считать, что основы научной теории происхождения и формирования пойм заложены. Расхождения во всех трех направлениях касаются в основном частных проблем, таких, как влияние климата, и в частности ветра, а также воздействия геологических, тектонических и ряда других факторов.

2.2 Классификация и типизация пойм

Вопросами классификации пойм занимался ряд исследователей и научных коллективов. В работах раннего периода, как правило, приведены простейшие классификации, в основу которых положены один-два определяющих фактора. В частности, интересным является предложение В. Р. Вильямса, выделившего поймы с гладким и гривистым рельефом, по признакам крупности характера залегания аллювия и рельефа поверхности. Наиболее детальная классификация пойм раннего периода, не потерявшая своего значения до настоящего времени, разработана Р.А. Еленевским. В ее основу положены характер растительности и особенности геоморфологии – рельеф поверхности, строение и происхождение поймы, по мнению Еленевского, наиболее полно отражающие специфические признаки аллювиального процесса. Он указывает, что в природе встречаются глинисто-зернистые, гривистые поймы (реки Кама, Волга), песчно-гривистые, но не слоистые (реки Днепр, Припять) и что в формировании поймы наибольшее значение имеет аллювиальный процесс. Систематизация пойм в данной классификации выполнена на широкой географической основе. Впоследствии именно эта классификация, доработанная с учетом типизации русловых процессов, была положена в основу типизации пойм ГГИ (таблица 2.1). Классификации пойм раннего периода основаны на концепции о связи их типов в основном с процессом осаждения взвешенных наносов в период половодья, нивелирующим рельеф поймы. В этих классификациях нет четкого разграничения речных и озерных пойм, современных и реликтовых. К этому же периоду также относится классификация пойм, разработанная в ГГИ для нужд гидрографических исследований, имеющая узко целевое назначение.

Более совершенной является классификация пойм, предложенная Е.В. Шанцером и основанная на связи типов пойм с типами русловых процессов. Учитывая их ограниченное количество, известное в то время, Шанцер выделяет только два основных типа пойм: сегментные и обвалованные, а также переходный — параллельно-гривистые (таблица 2.2).

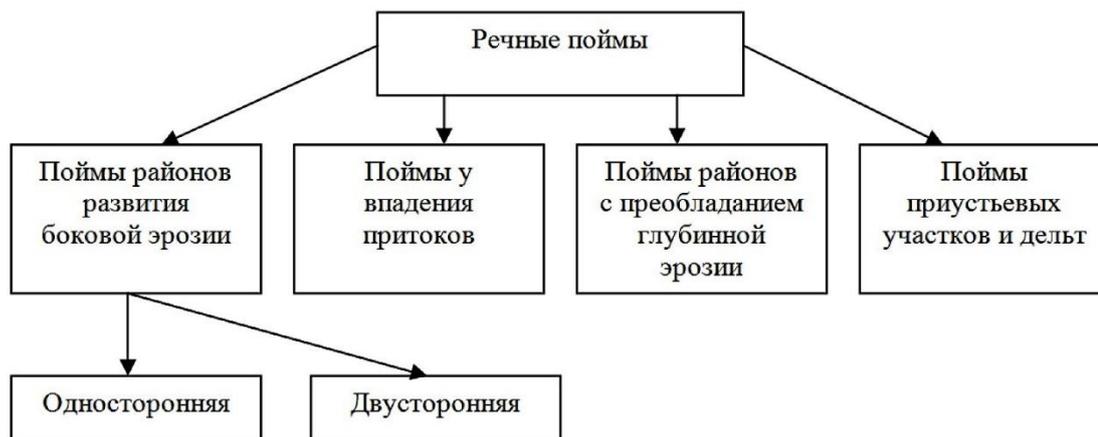
Таблица 2.2 – Классификация пойм Е.В. Шанцера



Дальнейшее совершенствование классификации пойм выполнено Н.И. Маккавеевым. Классифицируя их по ряду признаков, основными считает скорость накопления пойменной фации аллювия и эрозионные процессы, возникающие при затоплениях пойм (таблица 2.3).

Развивая концепции Н.И. Маккавеева, Р.С. Чалов предложил свою классификацию пойм (таблица 2.4). Различные при родные условия, а также специфика руслового и гидрологического режимов каждой реки обуславливают развитие разнообразных по рельефу поверхностей пойм.

Таблица 2.3 – Классификация Н.И. Маккавеева



Особенности морфологии пойм определяются рядом факторов, главнейшими из которых Чалов считает:

- 1) характер руслового режима реки, естественное и закономерное следствие которого – появление и развитие самих пойм;
- 2) вертикальные деформации русла;
- 3) затопление пойм высокими водами и связанные с этим процессы эрозии и аккумуляции на ее поверхности.

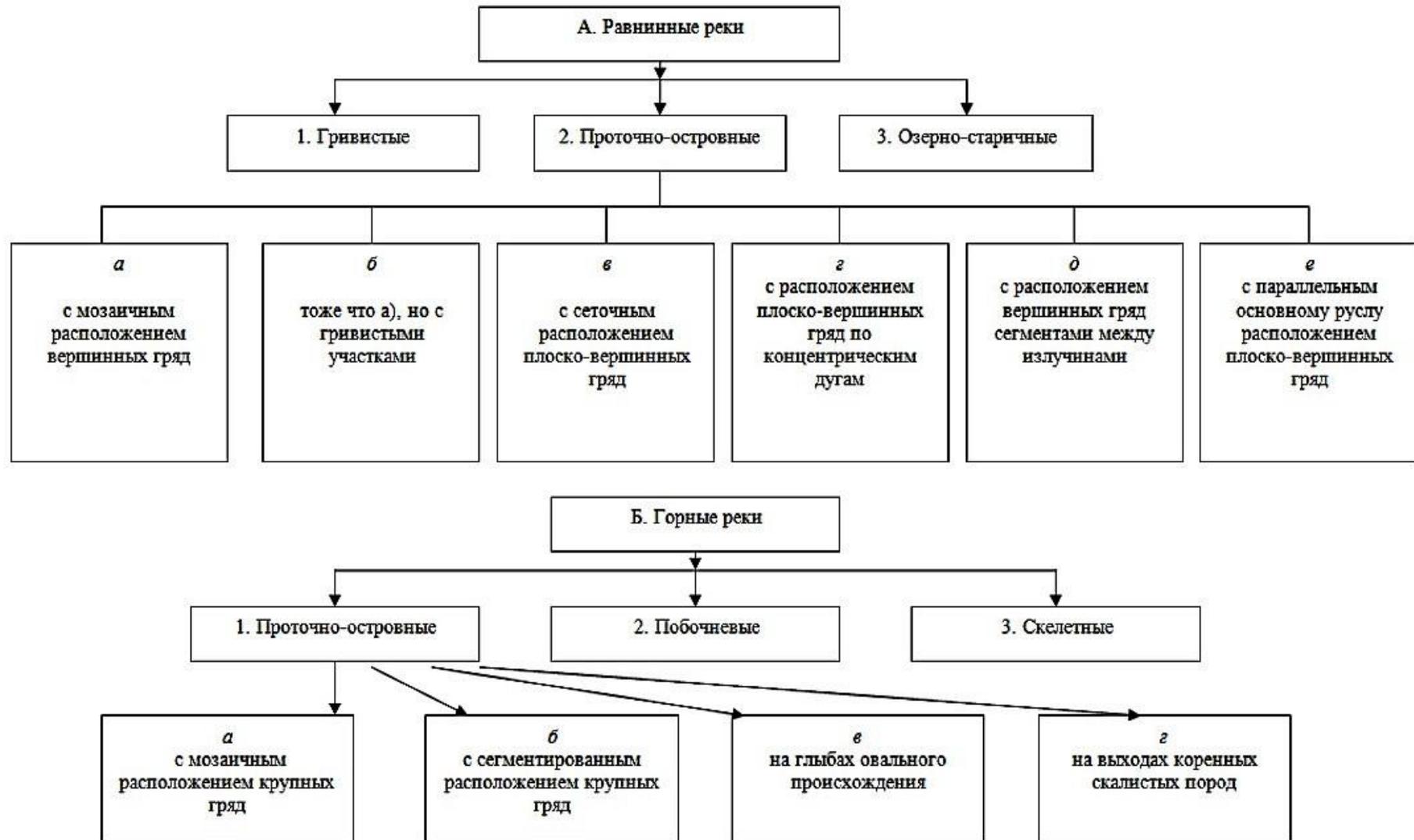
Кроме этого, существенное влияние могут оказать: эоловый фактор, процессы, протекающие на склонах речных долин, карст, мерзлотные явления и др. Каждому морфологическому типу русел соответствуют определенные черты морфологии пойм. Для меандрирующих рек характерна пойма с грядистым рельефом, рекам с разветвленным руслом – проточноостровная. На горных реках, руслоформирующая деятельность которых определяется бурным режимом потока и галечно-валунным аллювием, развиваются скелетные поймы. В межгорных впадинах и при выходе рек в предгорную область развиваются протечно-островные и ложбинно-островные поймы. Учитывая специфичность развития русел горных рек, автор выделил их поймы в отдельный класс. Недостатком данной классификации является отсутствие четких классификационных признаков. Создание в ГГИ теории руслового процесса позволило И.В. Попову разработать достаточно совершенную классификацию пойм, связав

ее с типами русловых процессов, также выделенными ГГИ, и приняв в качестве единицы типизации пойменный массив (таблица 2.1). Важнейшим признаком Попов считает тип руслового процесса и ряд других факторов: водный режим, значение и соотношение расходов донных и взвешенных наносов. Последние являются причиной образования разновидностей пойм. На особенности их строения также влияют и вторичные факторы – болотообразование, карст, вечная мерзлота, делювий и пр. Под совокупным воздействием руслового процесса различного типа и других указанных выше факторов образуются поймы с определенным морфологическим обликом и гидравлическими условиями протекания потока. Процесс взаимодействия потока, текущего по пойме и ее поверхности, со специфической морфологией весьма сложен. С одной стороны, поток, перенося и откладывая наносы, оказывает воздействие на формирование поверхности поймы, с другой – ее характер определяет гидравлику потока. В результате сложного взаимодействия этих факторов, а также типа руслового процесса формируется определенный тип поймы.

Участки пойм (в основном ограниченного и свободного меандрирования), обладающие определенными закономерностями морфологического строения и водного режима, были названы «пойменными массивами», которые характеризуются определенным сочетанием и общностью происхождения составляющих его морфологических элементов и соответствующим им замкнутым гидродинамическим циклом.

Данная классификация пойм является наиболее полной, но и она не лишена недостатков, основным из которых «является отсутствие фактора, учитывающего изменения характера процессов как во времени, так и по длине реки».

Таблица 2.4 – Типизация пойм по Р.С. Чалову



Таким образом, начало разработки научно обоснованной классификации пойм положено Р.А. Еленевским и Е.В. Шанцером. Последний впервые увязал классификацию пойм с типизацией русловых процессов. Наиболее совершенными являются классификации пойм, разработанные в ГГИ на основании обобщения работ предыдущего периода и МГУ. Особенно большое практическое значение имеет возможность их непосредственного использования для практических целей.

3 Гидравлика пойм

3.1 Многообразие аспектов проблемы гидравлики пойм. Связь гидравлики и морфологии пойм

В последние годы значительно вырос интерес к гидравлике потоков в руслах с поймами. Это обусловлено как значительно увеличившимся количеством и мощностью катастрофических паводков, по-видимому, взаимосвязанных с потеплением климата, так и с резким снижением качества гидрологической информации, особенно в системе Росгидромета. Действительно, несмотря на экономический кризис, продолжается и даже увеличивается, строительство мостовых переходов и трубопроводов через реки, разработка русловых и пойменных карьеров по добыче инертных материалов, водозаборов и других гидротехнических сооружений. В то же время для минимизации затрат на их строительство при сохранении их надежности повышаются требования к точности и надежности исходной, в частности гидрологической информации. К сожалению, максимальные и особенно катастрофические расходы воды, как правило, не измеряются, в частности из-за необходимости обеспечения требований техники безопасности при производстве работ. Значительно хуже обстоит вопрос получения информации о расходах и стоке донных наносов. Последние не только не измеряются на сети Росгидромета, но даже методика их измерения фактически отсутствует. Отдельные результаты измерений при грядовой форме их перемещения, полученные в различных проектных и научных организациях, нигде не публикуются и поэтому являются трудно доступными. Все это приводит к необходимости совершенствования методов расчетов как максимальных расходов воды на основе данных о максимальных уровнях и морфометрических характеристиках русел и пойм, так и расходов и стока донных наносов. Для совершенствования же расчетных методов необходимо изучить процесс пропуска паводков и половодий по затопленным поймам. Это является

особенно важным в свете последних достижений по проблеме взаимодействия руслового и пойменных потоков. Несмотря на принятые решения о комплексном использовании водных ресурсов, основным их потребителем в бывшем Советском Союзе, как правило, была гидроэнергетика. Другие отрасли как бы подстраивались под нее. В частности, интересы хозяйственного использования пойм часто приходят в противоречие с запросами энергетики. Поэтому проблема действительно комплексного использования рек требует глубокой проработки всех аспектов гидрологии и гидравлики. К сожалению, требования большинства водопотребителей противоположны друг другу, а волевые решения, как правило, направленные только на энергетическое использование рек, обычно не являются оптимальными, а иногда приводят к негативным последствиям. Так, например, строительство Волжских ГЭС привело к резкому снижению воспроизводства ценных пород рыб, затоплению и подтоплению обширных плодороднейших пойменных земель, а ГЭС в засушливых зонах – к остепнению нижерасположенных пойм. Таким образом, возникла и требует своего решения новая, тесно связанная с задачами охраны природы, проблема развития, формирования и затопления пойм, а также изменения гидравлики пойменных течений в условиях активного антропогенного воздействия на поймы. Рассмотрим следующие основные проблемы гидрологии и гидравлики пойм и пойменных массивов:

1. Разработка схемы динамики затопления и разгрузки пойм и пойменных массивов различных типов, позволяющей выполнять расчеты планов течений на них, определять продолжительность их затопления, играющей решающую роль при оценке сельскохозяйственной продуктивности пойм.

2. Усовершенствование теории трансформации волн попусков и паводков на реальных реках с их многообразием особенностей морфологического строения.

3. Расчет аккумулялирующей и регулирующей способностей пойм.

4. Разработка методик измерения и расчетов продольных и поперечных уклонов свободной поверхности пойменных потоков и пропускной способности русел с поймами.

5. Определение частоты и периодичности затопления пойм.

6. Разработка методики расчёта расходов и стока донных наносов на основе учёта эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Этот, далеко не полный, перечень проблем лишний раз свидетельствует о сложности задач, стоящих перед исследователями пойменных процессов. Тем более, что их нельзя свести ни к одномерной идеализации, ни к методике расчета параметров равномерного движения. Трудность решения проблемы обусловлена сложным морфологическим строением пойм, необходимостью его учета при решении различных задач гидрологии и гидравлики пойм, а также, в ряде случаев, малой частотой и глубиной их затопления. Более того, последние не только взаимосвязаны с морфологией пойм, но она в большинстве случаев оказывает решающее влияние на динамику затопления пойм и гидравлику пойменных потоков.

Гидравлика затопления пойм, главным образом, определяется их типом. При высоких уровнях, превышающих отметки бровок прирусловых валов, когда русловой и пойменный потоки сливаются в единый поток, его скоростное поле существенно трансформируется и в ряде случаев проявляется «кинематический эффект» безнапорного руслового и пойменного потоков [32].

Это же часто наблюдается и при более низких уровнях, когда сливаются отдельные пойменные потоки, протекающие по поверхностям с резко отличной шероховатостью и глубиной.

В 60-х годах прошлого века в ГГИ [18] проведены детальные исследования процессов затопления пойм и взаимодействия руслового и пойменного потоков. Следует также отметить работы ГГИ по исследованию трансформации попусков на реках Тверце [14] и Свири, а также исследования Московского гидромелиоративного института на р. Оке [19]. В связи с разработкой классификации пойм на основе созданной теории русловых

процессов в ГГИ были выполнены натурные исследования гидравлики затопления пойм раз личных типов на ряде рек бывшего СССР с использованием как наземных [11, 12, 14, 15 и др.], так и аэрометодов [17, 29, 34, 35 и др.]. В этих работах исследовался процесс затопления и разгрузки отдельных пойменных массивов на реках со свободным и не завершенным меандрированием, а также с пойменной многорукавностью. Процесс затопления таких пойм имеет ряд общих черт и поэтому можно выделить несколько фаз их затопления, в общем согласующихся с выделенными Маккавеевым Н.И.

Первая фаза – затопление низовых частей пойменных массивов. При свободном меандрировании затопление пойменного массива начинается с низовых частей через низовые прорывы, что, как правило, создает потоки на пойме, имеющие направление, обратное направлению руслового потока. Происходит заполнение понижений рельефа, на что безвозвратно уходят значительные объемы стока. В эту фазу основным является заполнение обширных аккумулятивных емкостей, приводящее к снижению расходов воды, в том числе и максимальных, в основном русле. На пойме наблюдаются местные течения по пониженным частям рельефа различных, иногда обратных основному потоку в русле направлений. Транзитный поток на массиве отсутствует, за исключением крупных протоков при пойменной многорукавности и незавершенном меандрировании. Вторая фаза, соответствующая средним уровням затопления поймы, характеризуется тем, что вода из русла поступает на массив через верховые прорывы и понижения прируслового вала в верхней части массива. На массиве наблюдаются отдельные застойные зоны или зоны замедленного течения. При пойменной многорукавности и незавершенном меандрировании (последнее занимает промежуточное положение) наблюдается интенсивное транзитное течение по крупным протокам. Начинается затопление поймы и перелив через верховые бровки, а также образование прорыв в них.

Третья фаза характеризуется образованием сквозного руслопойменного транзитного потока, наблюдающегося при высоких, близких к 1 %-ной

обеспеченности, уровнях воды. Пойма практически вся затоплена, за исключением отдельных повышенных останцев, образующих острова. Деятельность прорв затухает. В этой фазе наиболее полно проявляется взаимодействие руслового и пойменного потоков и возможен кинематический эффект на отдельных пойменных протоках с различной шероховатостью и глубиной. Он также возможен и на границах потоков, образующихся при поступлении пойменных вод в русло через прорвы.

Сведения об аккумулирующей способности пойм весьма ограничены и приведены в ряде работ [23, 26, 35, 39 и др.].

Можно считать, что до 80% общего объема стока весеннего половодья уходит на затопление пойменных емкостей в период подъема и постепенно отдается поймой на спаде, за исключением безвозвратных потерь на испарение, фильтрацию и заполнения бессточных пойменных озер и других понижений рельефа. Это свидетельствует о весьма значительной регулирующей роли поймы при пропуске половодий и летне-осенних паводков.

3.2 Доля пойменной составляющей в общем паводочном стоке рек

Вес пойменной составляющей в общем паводочном стоке рек возрастает с ростом уровней воды, т.е. с уменьшением процента обеспеченности максимального расхода воды.

Из анализа имеющихся материалов вытекает, что вес пойменной составляющей в общем расходе воды систематически возрастает. Но тенденция роста зависит от типа поймы, размеров, взаимного расположения геометрических осей поймы и русла, определяющих, в конечном счёте, положение динамических осей, и других факторов. На рисунке 3.1 приведены кривые зависимости отношения расхода воды пойменного отсека к полному расходу воды $\frac{Q_{п}}{Q_{р}+Q_{п}}$ от уровней воды (H'), отсчитываемых от бровки

приусловных валов $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f(H')$ и от относительных глубин в русле $\left(\frac{h_{\text{р}}}{h_{\text{рб}}}\right)$

$$\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f\left(\frac{h_{\text{р}}}{h_{\text{рб}}}\right).$$

Кривые зависимости $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f(H')$ образуют как бы три группы. К первой, характеризующееся замедленным ростом значение расхода воды, относятся реки с хорошо разработанным руслом и небольшой поймой. Оси руслового и пойменного потоков параллельным, течение на пойме слабое (Например, река Амур у с. Кумара, где при глубинных затопления поймы в 2 м, соответствующих расходу воды 2 – 5% обеспеченности, вес пойманной составляющей достигает только 1,4%).

Вторая группа, наиболее многочисленная, характеризуется наличием довольно широкой поймы $\left(\frac{B_{\text{п}}}{B_{\text{р}}} \geq 6 - 12\right)$.

На реках этой группы, как правило, оси руслового и пойменного потоков пересекаются под углами, в пределах 50 - 60°, что приводит к появлению четко выраженного кинематического эффекта в руслах с поймами. Кривые этой группы отличаются резким увеличением веса пойменной составляющей с ростом уровней (до 50% от общего расхода), затем это приращение несколько замедляется и кривые $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f(H')$ асимптотически приближаются к предельному значению $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}}$, равному 75-86% (Например, р. Сож в створе г. Славгорода это значение равно 86%). По-видимому, дальнейшая экстраполяция не изменит это значения, являющееся предельным. Если последующие проработки подтвердят наличие предельных значений веса пойменных составляющих, то это позволит уточнить и упростить методику расчёта максимальных расходов.

Третья группа занимает промежуточное между первой и второй положение (например, кривые для р. Ветлуга в створе Дубников и Мокши. Ход кривых $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f(H')$ характеризуется слабой, но значительно большей, чем у

первой группы, интенсивностью роста веса пойменной составляющей с уровнем.

По-видимому, целесообразно выделить и четвертый тип кривых. На рисунке 3.1-А он не представлен, так как не является характерным для расположения гидрометрических постов. Этот случай наиболее типичен для пойменных массивов свободного меандрирования, когда оси руслового и пойменного потоков при затоплении массива могут пересекаться под очень большими углами ($\alpha > 60^\circ$). При этом в русле возможны скорости обратного направления при пересечении руслового потока пойменным.

Кривые зависимости $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f\left(\frac{h_{\text{р}}}{h_{\text{рб}}}\right)$ в целом подтверждают выводы, основанные на анализе зависимости $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}} = f(H')$. В то же время их взаимное расположение более четко определяется влиянием в относительной ширины поймы $\left(\frac{B_{\text{п}}}{B_{\text{р}}}\right)$.

Попытка получить зависимость пропускной способности поймы $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}}+Q_{\text{п}}}$ от её гидравлического сопротивления $\left(\frac{n_{\text{р}}}{n_{\text{рб}}}\right)$ или $n_{\text{п}}$ не достигла успехов, хотя качественно это влияние прослеживается. По-видимому, необходимо искать другие способы учета влияния сопротивления поймы на величину её относительной пропускной способности.

3.3 Пропускная способность русел с поймами

При проектировании различных водопропускных сооружений, подсчете годового и максимального стока и ряде других случаях возникает необходимость расчета максимальных расходов воды в руслах с поймами. Однако не на всех постах имеются измерения расхода воды при затопленной пойме, хотя глубины затопления значительны.

Расчёт расхода воды по формуле Шези для русла с поймой, как для единого целого, дает резко отличные от натуральных данных результаты.

Н.Н. Павловским [14] была предложена методика расчета пропускной способности сложносоставных русел путем разбивки их на отсеки в местах резкого изменения поперечном профиле или шероховатости, то есть

$$Q = \sum Q_i = Q_p + \sum Q_{pi}, \quad (3.1)$$

с учётом формула Шези, ограничиваясь $i = 2$,

$$Q = \omega_p C_p \sqrt{h_p I_p} + \omega_{п1} C_{п1} \sqrt{h_{п1} I_{п1}} + \omega_{п2} C_{п2} \sqrt{h_{п2} I_{п2}}, \quad (3.2)$$

где ω – площадь живого сечения, m^2 ;

C – коэффициент Шези;

индексы «р» и «п» соответствует руслу и пойме.

Указана методика основана на ряде допущений основными из них являются: формула разработана для расчета скоростей потоков равномерного, установившегося режима. Близкий к ним так называемой квазиравномерный, квазиустановившийся режимы наблюдаются в меженный период. В течение прохождения высоких паводков, когда пойма затопляется, режим потока весьма существенно отличается от равномерного и установившегося, поэтому применение формулы Шези в этот период является определенным допущением. На данный недостаток методики указывали ряд авторов, но только в 1965 году Д.Е. Скородумовым [17] выполнен весьма тщательный анализ этого допущения на основе дифференциальных уравнений движения и неразрывности потока в открытом русле с переменным расходом

$$\begin{cases} I = \frac{V^2}{C^2 h} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{\alpha V^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{QV}{hg\omega}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = q. \end{cases} \quad (3.3)$$

Представив первое из системы этих уравнений в конечных разностях в виде

$$I = \frac{V^2}{C^2 h} + \frac{\alpha_H V_H^2 - \alpha_B V_B^2}{2gl} + \frac{V - V_g}{g\omega} \frac{Q_H - Q_B}{l} + \frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (3.4)$$

и используя данные специальных натуральных наблюдений в паводочный период, он оценил вес каждой из этих членов.

В уравнении (3.4):

I – уклон водной поверхности;

l – продольная координата;

t – время;

α – корректив скорости;

V – средняя скорость;

V_g – проекция скорости притекающих или оттекающих масс воды на направление средней скорости рассматриваемого потока.

Индексы «н» и «в» обозначают соответственно нижний верхний створы.

Так, по данным ежегодников им получено значение члена, характеризующего влияние неустановившиеся движения, равное $\frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0,00000012$, что, как отмечает автор, составляет доли процента от уклона в паводочный период на равнинных реках. Вес члена $\frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}$ невелик, его максимальное значение для равнинных паводков достигает 5% уклона свободной поверхности и не выходит за пределы точности измерений. Значительно сложнее оценка членов уравнения, учитывающих неравномерность движения и изменение расхода воды по длине водотока, ибо для этого необходимы данные измерений по крайней мере на двух створах, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, и сведения о притоке и оттоке.

Анализ веса этих членов, названных инерционными, также был выполнен Д.Е. Скородумовым.

Обозначив их соответственно через

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_H V_H^2 - \alpha_B V_B^2}{2gl} \quad \text{и} \quad \varepsilon_2 = \frac{V - V_g}{g\omega} \frac{Q_H - Q_B}{l}, \quad (3.5)$$

он по данным наблюдений на нескольких створах р. Луги и р. Пьяны определил значения инерционных членов, а по р. Дон лишь приближённо оценил их величины. Так, значения ε_1 достигает 0,000023 на р. Луге и 0,000030 на р. Пьяне, что составляет 25–28% (на р. Луга) и 55% (на р. Пьяне) от соответствующего значение уклона свободной поверхности. Однако значение ε_2 , хотя по абсолютной величине и значительно меньше ε_1 , но, как правило, для указанных рек имеет знак, противоположный ε_1 . Максимальные значения ε_2 по абсолютной величине достигают 0,000007 на реке Луге и 0,000025 на р. Пьяна, что составляет соответственно 10,0 и 19,4% от уклона свободной поверхности.

При переходе от дифференцирования конечными разностями возникает дополнительная погрешность, связанная с выбором расчётного значения « h ». Как вытекает из условий неразрывности, при постоянном по длине расходе воды, величина инерционного члена будет определяться характером изменения площадей поперечного сечения по длине реки.

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_H V_H^2 - \alpha_B V_B^2}{2gl} \approx \bar{\alpha} \frac{V_H^2 - V_B^2}{2gl}. \quad (3.6)$$

Допуская в первом приближении $\alpha_H \approx \alpha_B \approx \bar{\alpha}$ и учитывая, что $V = \frac{Q}{\omega}$, получим

$$\varepsilon_1 = \bar{\alpha} \frac{Q^2}{2gl} \left(\frac{1}{\omega_H^2} - \frac{1}{\omega_B^2} \right) = \frac{\bar{\alpha} Q^2}{2gl} \left(\frac{\omega_B^2 - \omega_H^2}{\omega_H^2 - \omega_B^2} \right). \quad (3.7)$$

Изменение площадей поперечных сечений по длине реки зависит от типа руслового процесса.

Если не учитывать инерционные члены, ошибка может быть существенно выше расчетной русловой составляющей скорости потока.

Вторым существенным недостатком расчёта Q_{\max} по уравнению (3.2) является допущение о равенстве уклонов свободной поверхности потоков в русле и на пойме. К сожалению, это вынужденная мера, обусловленная отсутствием методики и надежных данных измерений уклонов на пойме.

3.4 Способы расчета коэффициентов Шези и коэффициентов шероховатости в пойменных руслах

Третий существенный недостаток расчетов по формуле (3.2) состоит в неопределенности коэффициента Шези C как для русловой, так и особенно для пойменной частей потоков.

В настоящее время известно свыше 200 формул для расчета коэффициента C .

Все формулы можно подразделить на две группы. К первой группе относятся формулы, учитывающие коэффициенты шероховатости (n , l). Эта группа обширна.

Но для всех формул ошибки расчетов коэффициентов C для пойменного отсека значительно выше, чем для руслового. Так, по формуле Галмазы для русел наибольшее среднее из среднеквадратичных отклонений составляет 4,2%, а для поймы 24,1%.

Ко второй группе относятся формулы, основанные на учете уклонов свободной поверхности и крупности донных наносов [36, 38 и др].

Использование формул этой группы затруднительно из-за отсутствия качественных данных наблюдений за уклонами свободной поверхности и крупностью донных наносов.

Остановимся на формулах, которые получили наиболее широкое распространение и применяются в настоящее время для расчета гидравлических сопротивлений.

Из ранних эмпирических формул для определения коэффициента C следует отметить формулу Маннинга (1889), она имеет вид

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}, \quad (3.8)$$

где n – коэффициент шероховатости;

R – гидравлический радиус.

Все другие формулы раннего периода, а именно, формула Гангилье – Куттера и Базена, применяются в расчетах в зарубежной практике; у нас они не пользуются.

Н.Н. Павловский (1925) предложил обобщенную зависимость показательного типа. Для коэффициента C она имеет вид

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (3.9)$$

где y – величина переменная, зависит от R и n и определяется по эмпирической зависимости или по таблицам.

Из эмпирических формул можно назвать формулу Штриклера

$$C = 21,1 \sqrt[6]{\frac{R}{\alpha}}, \quad (3.10)$$

где α – величина неровностей русла.

В работе А.В. Караушева эта формула приводится к виду

$$C = 33 \left(\frac{H_{\text{ср}}}{\alpha} \right)^{1/6}, \quad (3.11)$$

где $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина в потоке;

α – средний диаметр частиц донных отложений в мм.

В формуле принято, что $n \approx 0.03\alpha^{1/6}$.

При выборе величины « n » для естественных речных русел пользуются таблицами, предложенные М.Ф. Срибным (для горных рек) и Б.В. Поляковым (для равнинных рек), А.В. Васильевой, Бредли, Агроскиным и др.

Одной из самых известных полуэмпирических формул является формула И.И. Агроскина (1949 г)

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R. \quad (3.12)$$

Использование формул второй группы затруднительно из-за отсутствия качественных данных наблюдений за уклоном свободной поверхности и крупностью донных наносов.

Формулы первой группы, как правило, просты по своей структуре и удобны для расчётов. Однако, они включает в себя значения коэффициентов шероховатости (n или I), которые являются условными и неопределёнными. Сопротивление не столько зависит от размеров частиц, слагающих русло, сколько от размеров и формы русла и донных гряд, режима потока, местных сопротивлений, взаимодействия руслового и пойменного потоков и других факторов.

Параметр « n » является некоторой интегральной характеристикой, зависящей от целого ряда факторов, учитывающих все многообразие проявлений сопротивлений движению потоков в руслах. Особенно сложным является определение значения « n » в потоках с поймами, где необходимо учитывать характер перемещения донных наносов, затраты энергии на транспорт взвешенных наносов, на косоструйность течения в створе измерения, взаимодействие руслового и пойменного потоков. В русле реки при затоплении поймы могут наблюдаться даже обратные течения, либо мощные водоворотные зоны, резко увеличивающие значение « n ».

Для анализа влияния пойменного потока на русловый при их слиянии могут быть использованы зависимости от уровней воды как для руслового ($\frac{n_p}{n_{p,б}} = f(H')$), так и для пойменного потоков ($\frac{n_{п}}{n_{p,б}} = f(H')$), где n_p , $n_{п}$ и $n_{p,б}$ соответственно значения для русла, поймы и русла при уровне затопления бровки. $H' = H - H_1$ т.е. есть при превышении уровня воды над отметкой прирусловых валов [12].

Как показал анализ полевых данных, уклоны, шероховатость и все морфометрические характеристики русла и поймы изменяются по ширине и длине потока. Особенно сложно обстоит вопрос изменения уклонов как по ширине и длине потока, так и с уровнем.

Значение уклона свободной поверхности тесно связана с величиной « n ».

$$n_{cp} = \frac{h^{2/3} * I^{1/2}}{V}. \quad (3.13)$$

Расширению долины соответствует интенсивный рост уклонов свободной поверхности, а сужению – их уменьшение с ростом уровней.

Существующие методы расчета пропускной способности, и, особенно, пойменных русел, либо обладает невысокой точностью (с использованием формулы Шези), либо несколько сложны и требует полевых измерений, по крайней мере, в двух створах. В то же время, недостатки методики с использованием формулы Шези в несколько завуалированном виде включены в параметры « n » или « I ».

Различными авторами (М.Ф. Срибным, Бредли, И.И. Агроскиным, В.Г. Чоу, Л.Л. Васильевой) разработаны таблицы для определения значений этих параметров по описанию сопротивления русла и поймы в расчетном створе. Все они не дают идентичные значения для однозначных описаний сопротивлений. Все авторы отмечают зависимость коэффициентов шероховатости от глубины.

Поэтому одной из задач нашего исследования является расчёт параметров « n » на пойменном створе и уточнение их зависимости от глубин в свете последних разработок о взаимодействии руслового и пойменного потоков.

3.5 Взаимодействие руслового и пойменного потоков

Суть проблемы взаимодействия руслового и пойменного потоков стоит в уменьшение пропускной способности сложносоставных русел, частным случаем которых являются русла с поймами, за счёт дополнительных сопротивлений, возникающих при движении отсеков потока с различными скоростями.

По характеру взаимодействия можно выделить 4 типа потоков.

Первый тип характеризуется параллельностью динамических осей руслового и пойменного потоков, а, следовательно, и параллельностью геометрических осей русла и поймы (рисунок 3.1). Дополнительные сопротивления при этом типе взаимодействия потоков создаются за счет

возникновения вихрей с вертикальной осью вращения и их перемещения в сторону потока, движущегося с большей скоростью, т. е. руслового потока. На образование таких вихрей, захватывающих массы пойменного потока, их перемещение, обтекание массами руслового и сообщение им добавочной энергии для увеличения продольных скоростей до значений соответствующих скоростей в русловом потоке, а также на компенсационные течения затрачивается существенное количество энергии руслового потока. Это приводит к снижению его пропускной способности в пределе, достигающем 15% [22, 26].

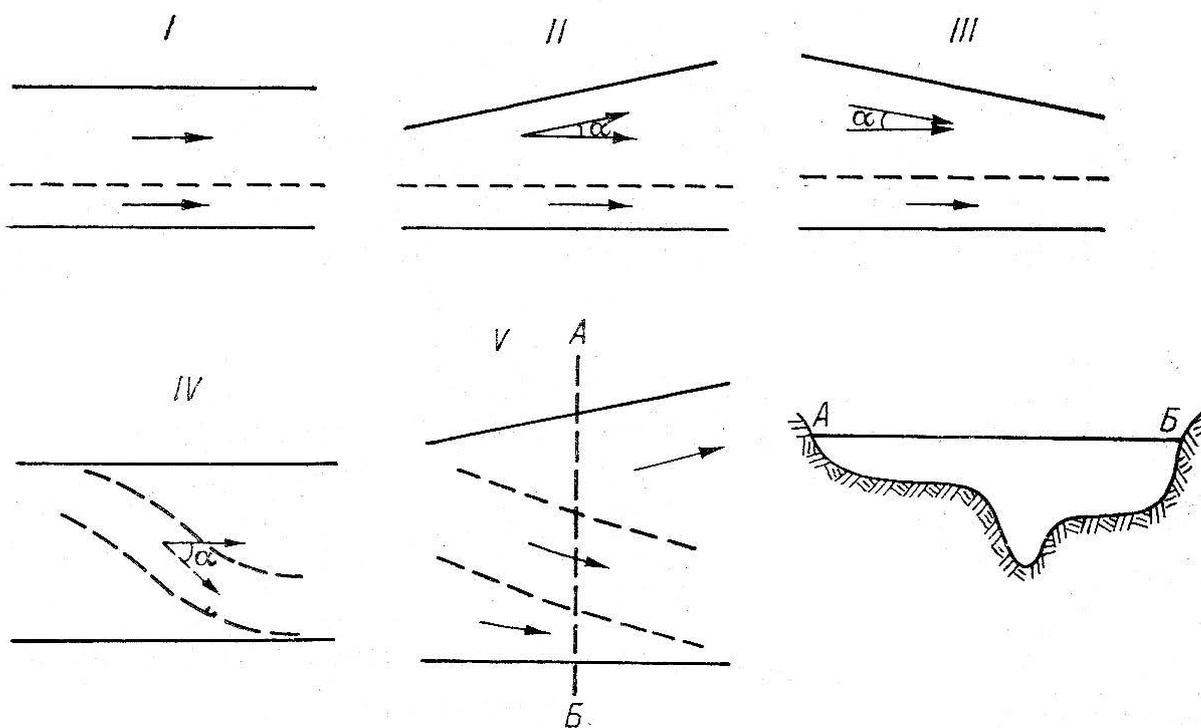


Рисунок 3.1 – Типы взаимодействия руслового и пойменного потоков

Происходит изменение распределение скоростей по сечению руслового и пойменного потоков, а также изменение эпюры распределения средних на вертикали скоростей по его ширине.

Второй тип взаимодействия руслового и пойменного потоков характеризуется расхождением их динамических осей (рисунок 3.1). Это может

наблюдаться как при непараллельности геометрических осей русла и поймы, так и при их параллельности, когда подача воды на пойму меньше, а в русло больше их пропускной способности [22]. При этом типе взаимодействия [22, 23, 22, 28 и др.], как правило, наблюдается увеличение расходов воды в русловой части потока и некоторое увеличение в пойменной по сравнению с аналогичными отсеками потока, изолированными продольной стеклянной тонкостенной перегородкой. Это увеличение пропускной способности в основном обусловлено значительным увеличением уклонов свободной поверхности, а так же уменьшением затрат энергии на трение об указанную перегородку и некоторым увеличением площади сечения потока в целом за счет изъятия этой разделительной перегородки.

Данный тип взаимодействия потоков довольно часто встречается в природных условиях. Однако основной причиной поступления масс руслового потока на пойму является расширение долины вниз по течению реки, а также при затоплении поймы в период подъёма уровней при пропуске паводков и половодий.

Третий тип взаимодействия характеризуется схождением динамических осей руслового и пойменного потоков (рисунок 3.1). Как и у II типа, геометрические оси русла и поймы могут быть параллельными или непараллельными. При III типе взаимодействия массы пойменного потока поступают в русловой под различными углами, вызывая торможение последнего и уменьшая тем самым его пропускную способность. Это уменьшение находится в прямой зависимости от разности скоростей и угла α схождения динамических осей взаимодействующих потоков. Затраты энергии руслового потока на процесс массообмена, перемешивание его масс с поступившими массами пойменного потока и на повышение их скоростей весьма значительны и могут приводить (по данным экспериментов) к уменьшению пропускной способности руслового отсека потока на 50% и более [22, 24]. При этом скорости пойменного потока возрастают незначительно, что приводит к существенному уменьшению пропускной способности по тока в

целом. Анализ обширных натуральных материалов, выполненный автором [11, 22], подтвердив полученные выше выводы, показал, что основной причиной данного типа взаимодействия является сужение долины, а, следовательно, и поймы, вниз по течению реки. Аналогичный процесс наблюдается и при разгрузке пойм при спаде уровней при пропуске паводков и половодий по затопленным поймам. Данный тип взаимодействия потоков также широко распространен в натуральных условиях.

Четвертый тип взаимодействия, характеризующийся пересечением динамических осей руслового и пойменного потоков, является одним из наиболее распространенных (рисунок 3.1). В натуральных условиях он наблюдается при меандрирующих типах руслового процесса, на долю которых, по данным И.В. Попова, приходится преобладающее количество участков обследованных им равнинных рек. Этот тип взаимодействия потоков как бы обобщает три предшествующих. Действительно, при углах пересечения динамических осей потоков (α), близких к нулю, переходим к I типу. При углах $0^\circ < \alpha \leq 50^\circ$ в зависимости от характера изменения ширины долины и поймы отмечается тип взаимодействия руслового и пойменного потоков, аналогичный II (расширение поймы) или III (сужение поймы) типу. В то же время при больших углах пересечения динамических осей потоков ($\alpha \geq 90^\circ$), а в природных условиях даже при углах, меньших 90° , отмечается принципиально новый характер взаимодействия руслового и пойменного потоков, когда затраты энергии русловым потоком настолько велики, что течение в нем прекращается или даже наблюдается обратное [22, 28]. Аналогичный процесс наблюдается и при разгрузке пойм при спаде уровней, при пропуске паводков и половодий по затопленным поймам при углах α , равных и больших 90° , верхняя (по отношению к пойменному потоку) бровка коренного русла выполняет роль гребня водослива, а в русле образуется безрасходная водоворотная зона, размеры которой определяются соотношением величин скоростей и глубин пойменного и руслового потоков [22, 14].

Таким образом, выделенные по данным экспериментальных работ на схематизированных моделях четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков в основном подтверждаются натурными данными. При этом первые три типа, как правило, соответствуют потокам в руслах с односторонними поймами, а четвертый – в руслах с двусторонними поймами. Приведенная типизация недоучитывает изменения ширины русла и поймы по длине реки и при разных уровнях воды, которые определяют гидравлику потоков в русле и на пойме и тип их взаимодействия. Таким образом, типизация не охватывает всего многообразия природных условий и требует соответствующей доработки. Поэтому целесообразно дополнить ее V типом взаимодействия руслового и пойменного потоков, отнеся к нему наиболее сложные случаи взаимодействия потоков в руслах с двусторонними, разновысотными поймами и поймами, характер изменения ширины которых по длине реки различен при различных уровнях воды (рисунок 3.1). Основным признаком этого типа взаимодействия является изменение направления динамической оси пойменного потока относительно оси руслового при изменении уровня воды. Этот сложный тип взаимодействия потоков довольно часто наблюдается в природных условиях, в частности на реках с двумя разновысотными поймами, когда при подключении первой относительно узкой поймы ее воды поступают в русло (или, наоборот, из русла на пойму), а при подключении второй, более широкой поймы, воды из русла поступают на пойму (или, на оборот, из поймы в русло). Это обычно приводит к изменению характера взаимодействия потоков, т. е. в приведенном случае при подключении первой поймы будет III (II) тип взаимодействия руслового и пойменного потоков, а при подключении второй поймы характер взаимодействия потоков изменится соответственно на II (III). Аналогичная картина может наблюдаться и при увеличении уровня воды, когда за счет рельефа сужение (расширение) может смениться расширением (сужением) поймы по длине реки. Сложность процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков при этом типе заключается в определении периода

релаксации при изменении типа взаимодействия потоков при увеличении или уменьшении уровня воды. Время периода релаксации зависит от мощности взаимодействующих потоков и, в конечном итоге, от ширины и глубины затопления последующей поймы (или ее части).

При малых их значениях на более высокой пойме смена типа взаимодействия потоков может вообще не произойти, так как мощности присоединяющегося потока будет недостаточно, чтобы изменить направление первого более мощного руслопойменного потока. Однако при этом будет наблюдаться некоторое торможение основного потока.

3.5.1 Учет эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчете пропускной способности русел с поймами

Как вытекает из анализа обширной литературы, посвященной данной проблеме [29, 22, 1, 5, 26, 30, 31 и др]. Методика расчёта расхода воды в руслах с поймами разработана недостаточно.

Наметились два пути решения проблемы.

Первый – основан на введении поправочных коэффициентов к русловой (k_p) и пойменной (k_n) составляющим расхода воды:

$$Q = k_p Q_p + k_n Q_n. \quad (3.14)$$

Для расчёта значений k предложено большое количество формул, которые учитывают уменьшение расхода в русле под влиянием пойменного потока.

Второй путь решения проблемы расчета скоростей руслового и пойменного потоков в условиях их взаимодействия основан на анализе системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности с целью получения хотя бы приближенных уравнений.

Одним из первых явилось предложение Д.Е. Скородумова, который на основании решения системы уравнений движения потока с переменной массой и неразрывности получил уравнение (3.4). В этом уравнении есть им был

введён член $i_{\text{взаим.}}$, частично учитывающий взаимодействие руслового и пойменного потоков.

С учетом этого члена, уравнение (3.4) в конечных разностях будет писаться в виде

$$I = \frac{V^2}{C^2 h} + \frac{\alpha_H V_H^2 - \alpha_B V_B^2}{2gl} + \frac{V - V_g}{g\omega} \frac{Q_H - Q_B}{l} + i_{\text{взаим.}} + \frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (3.15)$$

Аналитическое решение расчёта параметров потока сложносоставного сечения отсутствует, а эмпирические, приближенные методы, как правило, был основан на лабораторных данных и расчеты по ним, дают результаты, существенно отличающиеся от натуральных.

Уклон, шероховатость и все морфологические характеристики русла и поймы изменяются по ширине и длине потока. Особенно сложно обстоит вопрос изменения уклонов как по ширине и длине водотока, так и по мере изменения уровней.

Значение уклона свободной поверхности тесно связано с величиной « n ».

$$n_{\phi} = \frac{h^{0.5+y} I^{0.5}}{V}. \quad (3.16)$$

Характер изменения уклона свободной поверхности при уровнях выше бровки прирусловых валов, как правило, определяется характером изменения ширины поймы по длине водотока.

Расширению долины ниже створа измерения соответствует интенсивный рост уклонов свободной поверхности, а сужению – их уменьшение с ростом уровней.

Для расширяющихся долины или долин с постоянной шириной характерны кривые $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$ первого типа, где максимальные значения $\frac{\Delta n_{p.п}}{n_{p.б}}$

соответствуют $\frac{n_p}{n_{p.б}} - 1$ в точке их перегиба. Для остальных – максимальным отклонением от единицы.

Второму типу кривых соответствует сужающиеся долины.

По характеру изменения можно выделить четыре типа кривых $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$. Наиболее распространён тип А, характеризующийся резким уменьшением значений $\frac{n_p}{n_{p.б}}$ при увеличении глубины на пойме. Близким к нему является тип Б, отличающийся только тем, что при подъеме уровня значение $\frac{n_p}{n_{p.б}}$ становятся меньше 1,0.

Кривые типов А и В составляют 80% от общего количества кривых.

Тип В характеризуется неизменностью значение $\frac{n_p}{n_{p.б}}$ с ростом уровней, при этом значение $\frac{n_p}{n_{p.б}} < 1$. Этот тип поймы характеризуется ровным рельефом и луговой растительностью. Для них, как правило, табличные значения « n » завышены в 1,5 – 2 раза.

Тип Г характеризуется резким увеличением значений « n_p », а затем их снижением с ростом уровней воды. Такой ход кривых может быть обусловлен наличием на пойме искусственных сооружений.

4 Анализ исходных данных и построение расчетных зависимостей

4.1 Исходные данные

Для изучения сопротивления русловых и пойменных потоков были использованы данные натурных наблюдений на 5 гидрологических постах расположенных Ленинградской области:

1. р. Луга – ст. Толмачёво (1976 – 1977);
2. р. Луга – д. Воронино (1966);
3. р. Луга – г. Луга (1966);
4. р. Тигода – ст. Любань (1966);
5. р. Оредеж – д. Моровино (1966).

1966 год наиболее многоводный среди последних лет, весеннее половодье этого года отличается наиболее высоким уровнем, поэтому, тогда было измерено много расходов воды по затопленной пойме.

При публикации данных измерений о расходах, скоростях и других характеристиках потока, сведения о них издаются отдельно для русла и для поймы приводятся только до уровней, при которых эти потоки сливаются. При более высоких уровнях публикуются сведения для потока в целом, без деления его на русловую и пойменную составляющие, что создает дополнительные трудности при отборе исходных данных для анализа.

Исходя из этого, по данным книжек для измерения расходов воды был выполнен расчет расхода, скоростей и других характеристик потока отдельно для русла и для поймы. При этом разделение руслового и пойменного потоков осуществлялось вертикальными плоскостями, проходящими по бровкам прирусловых валов, хотя было бы более правильно выделить русловую составляющую по параболе.

Расчет скоростного коэффициента Шези «С» выполни по формуле

$$C = \frac{V}{\sqrt{hI}} \quad (4.1)$$

В связи с отсутствием измерения уклонов на пойме, при расчёте C_n принималась допущение, что $i_n = i_p$.

Расчёт гидравлического сопротивления « n » осуществлялся по формуле Н.П. Павловского

$$n = \frac{1}{C} h^y, \quad (4.2)$$

причём « y » принимается равным $1,5\sqrt{n}$ при $h < 1$ м, $y = 1,3\sqrt{n}$ – при $h > 1$ м. При $h > 5$ м коэффициент « C » вычислялся по формуле Маннинга:

$$n = \frac{1}{C} h^{\frac{1}{6}}. \quad (4.3)$$

4.1.1 Описание рек на участке измерений

р. Луга – ст. Толмачево. Окружающая местность холмистая, покрытая хвойным лесом. Долина реки ясно выражена, шириной 1,2 км: правый склон крутой, левый – пологий, высота склонов – 18 м. Склоны поросли кустарником, хвойным лесом, частично занятые постройками.

Пойма двухсторонняя, шириной до 600 м. Ниже поста, в районе гидрострова №3 пойма резко сужается до 300 м. Пойма луговая, затопляется при уровне 120 см над «0» графика. Русло извилистое, слабо деформирующиеся, зарастает водной растительностью. Дно песчано-илистое с включением гальки. В осенний период почти ежегодно на участке от водпоста до гидроствора №3 наблюдаются зажоры, а в отдельные годы - заторы. Река используется для судоходства.

Расходы воды в меженный период измеряются на гидростворе №1, расположенном в 66 м выше водпоста. За постоянное начало принят столб на левом берегу. В паводочный период расхода воды измеряется на гидростворе №3, расположенном в 2,9 км ниже водпоста. За постоянное начало принят R_p

№2 на левом берегу. В пределах уровня воды 121 – 190 см при невозможности измерения расходов на гидростворе №1 и неудобства измерений на гидростворе №3 расходы воды измеряются на временном гидростворе расположенном 0,8 км ниже водпоста. Створы оборудованы тросово – лодочными переправами. Уклоны водной поверхности измеряются путем одновременного измерения уровня на гидростворе №3. Нижний уклонный пост свайного типа.

В районе гидроствора №3 можно выделить левобережную пойму (затапливается при уровне 220 см над «0» графика); это – пастбище без кустов, рельеф неровный, имеются старицы. Склон долины покрытой лесом.

На правом берегу пойма разделена на две части: центральная пойма – от русла реки до высокого прируслового вала, шириной до 40 м. От прируслового вала (его отметка 370 – 375 см над «0» графика, причём уровень дан по водомерному посту) до склона долины – правобережная пойма. Вся правобережная пойма представляет собой луг с редкими кустарниками и отдельными деревьями, затапливаемая при ГВВ. Причём кустов больше у прируслового вала. Рельеф поймы слегка холмистый, имеются старицы, канавы. Уровень начала стока по пойме правого берега – 220 см для центральной части и 270 см – для основной правобережной поймы. Такое выделение поймы представляет собой первый вариант. По второму варианту более узкая и крутая левобережная пойма и часть правобережной поймы до прируслового вала присоединены к руслу. Выделена одна лишь правобережная пойма – от прируслового вала до склона долины. Все расчеты произведены для двух вариантов выделения пойменной составляющей.

В 1976 году было измерено лишь два расхода при уровнях, превышающих $H_{рб}$, поэтому рассмотрены также данные 1977 года, когда при едином потоке измерено 6 расходов.

При выходе воды на пойму наблюдается прекращение роста русловой составляющей расхода воды до уровней, близких к наивысшим. Одновременно происходит увеличение пойменной составляющих расхода, увеличение расхода воды потока в целом. Наиболее интенсивен рост расхода воды на

правобережной пойме. Это объясняется увеличением площади живого сечения с ростом уровня, а также увеличением скоростей. Последнее происходит потому, что середина поймы близка к середине долины, русло же смещено к левому берегу. При высоких уровнях ось потока стремится к оси долины, в то время, как русло свободно меандрирует по долине.

При выходе воды на пойму происходит резкое увеличение площади живого сечения за счёт пойменных составляющих. Наиболее интенсивно увеличивается с ростом уровня и площадь водного сечения правобережной поймы.

Кривая зависимости $V_p = f(H)$ показывает, что при затоплении поймы с повышением уровня воды происходит уменьшение скоростей руслового потока. Это объясняется взаимодействием руслового и пойменного потоков. Это наглядно представлено кривой зависимости средней скорости воды от уровня на «центральной» пойме: до уровня $H_{рб}$ скорость возрастает, а при слиянии с пойменным потоком – резко начинает уменьшаться.

При достаточно высоком уровне над бровкой прируслового вала скорости поймы и русла выравниваются. Исключение составляют лишь скорости на «центральной» пойме, она меньше остальных. Это объясняется тем, что здесь гуще растительность и более неровный рельеф выше по течению. К тому же выше находится излучина русла, расположенная почти перпендикулярно к пойменному потоку.

Общая ширина потока резко увеличивается при выходе воды на пойму и слиянии потоков. Так как русло и «центральная» пойма ограничены вертикальными плоскостями, то их ширина после слияния руслового и пойменных потоков остается постоянной.

Средняя глубина руслового потока увеличивается пропорционально уровню воды. Общая глубина потока при слиянии руслового и пойменного потоков уменьшается за счет незначительных глубин на пойме и большой её ширины.

Уклоны водной поверхности до выхода воды на пойму постоянны для всех уровней. После выхода на пойму начинаются уменьшение уклонов с ростом уровней. Это объясняется морфологией поймой. Створ расположен в самом сужение долины. Уменьшение уклонов объясняется аккумулярующей способностью поймы.

Нужно отметить еще одно важное явление. На данном посту ежегодно при высоком половодье наблюдаются петли кривых $Q = f(H)$ и $V = f(H)$. Ветвь спада кривой расположена правее ветви подъема, т.е. наблюдается обратная петля. Скорости и расходы на спаде половодья выше, чем на подъеме. Нами был произведен подсчет объема воды, аккумулярованного поймой на подъеме уровня воды, а также объема стока, полученного за счёт разности объема стока на спаде и подъеме уровней.

По расчетам получилось:

- объем аккумуляции $0,022 \text{ км}^3$;
- разность стока подъема и спада половодья – $0,022 \text{ км}^3$.

На кривых зависимости $n = f(H)$ также отмечается петля аналогично кривым $V = f(H)$. Однако разброс точек, соответствующих исходных данных, невелик, потому в качестве расчётной принята осредненная кривая. Значения « n » для русла увеличивается с увеличением уровней до $H_{рб}$ и выше, что можно объяснить увеличением сопротивлений за счет взаимодействия руслового и пойменного потоков. Анализ кривых $n = f(H)$ для пойменной части позволяет сделать вывод, что в начале заполнения поймы значения « n » достаточно велики (12,0 и выше); по мере увеличения глубин « n » уменьшаются и выравниваются. Лишь кривая $n = f(H)$ для «центральной» поймы иллюстрируют увеличение « n » с ростом уровня выше $H_{бровка}$. Это можно объяснить тем, что данный отсек поймы расположен между руслом и основной поймой, а также тем, что эта часть поймы заросла довольно густым кустарником и имеет сложный рельеф.

Кривые $C = f(H)$ является зеркальным отображением кривых $n = f(H)$.

Кривые зависимостей расходных характеристик от уровня воды построены по второму варианту выделения пойменного потока, после выхода

воды на правобережную пойму ведут себя так же, как и в первом варианте. Но при уровне, соответствующем выходу воды на левобережную пойму, включенную в русловой поток, все кривые имеют изгиб, характерный выходу воды на пойму. Это показывает, что второй вариант разделения неверен.

р. Луга – д. Воронино. Местность в районе поста слабовсхолмленная равнина, покрытая сельскохозяйственными угодьями, смешанным лесом и кустарником. Долина реки ясно выражена, шириной 1,5 километра, склоны пологие, высотой 6 – 8 м, заняты кустарником и сельскохозяйственными угодьями. Пойма левобережная, шириной 200 – 250 м, луговая, заросла кустарником, затопливается при уровне 190 см над «0» графика.

Русло реки извилистое со сменой плёсовых и перекатных участков. Берега русла на перекатах пологие, высотой до 2 м; на плесах – крутые, высотой до 4 м. Дно русла сложено песчано-илистыми отложениями, зарастают водной растительностью по всей ширине реки. Деформации русла не наблюдаются.

При уровнях выше 320 см вода с затопленной поймы р. Луги на участке, расположенном в 2,5 км выше водпоста, затопливается проток на правом склоне долины р. Луги, которая течет в р. Тресну, впадающую в р. Лугу в 3 км ниже водпоста. В отдельные годы на изгибах реки образуются небольшие заторы льда. Пересыхания и перемерзания реки не наблюдалось.

Гидроствор №1 в створе водпоста оборудован тросово – лодочной переправой. За постоянно начала принят Рр №19. Гидроствор используется для измерения расходов воды в межень – до уровня 190 см.

Гидроствор №2 расположен в 1 км выше водпоста, оборудован тросово – лодочной переправой. За постоянное начало принят столб на правом берегу.

Гидроствор используется для измерения расходов воды при уровнях воды выше 190 см.

В паводочный период ширина поймы на гидростворе №2 достигает 200 м, скорости течения воды на пойме небольшие – менее 8 см/сек, поэтому учет стока недостаточно точен.

Для учета стока на протоке измерения расходов производится на дополнительных створах с шоссеного моста на дороге Воронино – Мойка в 2,5 км выше водпоста или с моста на дороге Воронино – Батецкая.

С 1975 года в 910 м выше водпоста оборудован временный гидрометрический створ для измерения расхода при уровне 190 – 300 см.

В данной работе использованы материалы наблюдений на гидростворе №2. К сожалению, наибольший уровень над бровкой прируслового вала составляет лишь 35 см. При измерении расхода воды данные по пойме занижены вследствие недоучета скоростей, измеренных вертушкой. Одним из недостатков является и то, что водомерный пост расположен в 1 км ниже по течению, за насыпью автомобильной дороги, а уклоны не измеряются.

Возможно несоответствие уровней воды на водпосту и гидростворе номер №2.

В районе гидроствора номер №2 правый берег крутой, без кустов. Левая пойма имеет неровный рельеф, покрыта густыми кустами. Пойма расширяется. Пойменный поток составляют с русловым угол в $35^\circ - 40^\circ$. Пойма затапливается при уровне $H_{рб} = 365$ см.

До уровня $H_{рб}$ и выхода воды на пойму все характеристики увеличиваются с ростом уровня. При достижении $H_{рб}$ наблюдается отклонения вправо кривых $\omega = f(H)$ и $B = f(H)$ для потока в целом. Кривые $V = f(H)$ и $h_{ср} = f(H)$ отклоняется влево, в то время, как те же зависимости для руслового отсека продолжают увеличиваться.

Рост скоростей в русловом отсеке после выхода воды на пойму и слияния потоков объясняется слабым взаимодействием руслового и пойменного потоков, что обусловлено большим зарастанием поймы, малыми глубинами и малыми скоростями на ней.

Кривые $Q = f(H)$ для русла и потока в целом почти сливаются. Расходы на пойме малы (не более $8,50 \text{ м}^3/\text{с}$), несмотря на большую площадь живого сечения (186 м^2). Это также происходит из-за зарастания поймы.

Кривая $h_{\text{cp}} = f(H)$ для русла имеет отклонение влево после выхода воды на пойму. Это происходит потому, что не точно произведено выделение руслового потока.

По типу взаимодействие руслового и пойменного потоков створ можно отнести к II типу: вода переходит из русла на пойму, расширение долины.

р. Луга – г. Луга. Окружающая местность – всхолмленная равнина, сложенная песками, поросшая хвойным лесом, занята постройками и сельскохозяйственными угодьями.

Долина реки V-образной формы шириной 200 – 300 м. Склоны долины умеренно крутые, высотой 12 м, поросли редким сосновым лесом, заняты огородами и постройками.

Пойма чередующаяся, на участке поста левобережная, занята огородами, местами поросла кустарниками, шириной 40 – 50 м, затопляется при уровне 365 см над «0» графика. Русло реки извилистое, берега умеренно крутые, высотой 4 – 5 м, луговые, местами поросли кустарником, на склонах имеются выходы грунтовых вод. Дно русла песчаное, устойчивое, по всей ширине зарастает водной растительностью.

Ниже водпоста возможно образование заторов и зажоров, вызывающих незначительный подъем уровня воды.

Пересыхание и перемерзание реки не наблюдалось.

Гидроствор №2 расположен в 11,6 м выше водпоста, закреплен на правом берегу столбом постоянного начала, на левом – зачальным столбом. Оборудован тросово – лодочной переправой. Используется, в основном, для измерения в межень.

Гидроствор №3 расположен в 14,6 м выше водпоста, с 19/IV 1970 года оборудован дистанционной автоматической установкой ГР - 64. Используется, в основном, для измерений в паводок.

В этой работе использованы измерения на гидростворе №2.

После выхода воды на пойму наблюдается отклонение кривой $\omega = f(H)$ и $B = f(H)$ вправо. Наоборот, влево отклоняется кривая $h_{\text{ср}} = f(H)$ за счёт широкой и мелкой поймы.

Скорости на пойме незначительны. Вследствие этого, расход на пойменном отсеке не превышает $0,26 \text{ м}^3/\text{с}$.

Наблюдается рост скоростей после выхода воды на пойму, и при слиянии потоков. Это можно объяснить тем, что ниже по течению расположена насыпь автомобильной дороги с пропускным отверстием для русла реки, а пойма перекрыта.

Створ р. Луга – г. Луга относятся к первому типу взаимодействия: оси руслового и пойменного потоков параллельны, уменьшение пропускной способности русла невелико, почти отсутствуют.

р. Тигода – ст. Любань. Прилегающая местность – равнина, покрытая с левого берега мелким лесом и кустарником, с правого – распаханная. Сложена глинами, суглинками с примесью песка. Долина выражены слабо. Пойма правобережная, распаханная, шириной 100 – 200 м, затопляется при уровне 410 см.

Русло извилистое, на участке поста – слабоизогнутое. Берега крутые: левый берег коренной, высотой 5 – 6 м, правый – пойменной, низкий – 2–3 м. Грунты представлены глинами и суглинками. Дно реки песчаное с валунами, устойчивое, значительно зарастает.

Заторов никогда не бывает. В 4 км ниже поста в 1970 г построена водозаборная плотина, создающая подпор на посту.

Кривые зависимостей расходных характеристик от уровня воды показывают имеющееся взаимодействие руслового и пойменного потоков.

После выхода воды на пойму расходы воды растут с уровнем, в то время, как расходы в русле на некоторое время рост прекращают. В этот период наблюдается интенсивное увеличение пойменных расходов.

При уровнях, близких к максимальным, отмечено выравнивание скоростей течения на пойме и в русле. Это достигается взаимодействием руслового и пойменного потоков.

Створ можно отнести к III типу взаимодействия руслового и пойменного потоков: пересечение руслового и пойменного потоков под углом 30° , резкое уменьшение пропускной способности русла.

р. Оредеж – д. Моровино. Прилегающая местность – всхолмленная равнина, сложенная супесями с прослойками глины, поросшая смешанным лесом, занятая с/хоз. угодьями. Долина реки ясно выражена, шириной 1 км, правый склон пологий, левый – крутой, высотой 20 м. Склоны поросли кустарником и лесом, в местах выхода грунтовых вод заболочены. Пойма двухсторонняя, в районе поста – правобережная, шириной 0,6 км, поросшая луговой растительностью, кустарником.

Затапливается пойма в районе поста водой снизу при уровне 200 см над «0» графика. Сток на пойме начинается при уровне 340 см. На пойме имеется большое количество озер, в 0,6 км ниже поста расположено озеро Антоновское, через которое протекает река Оредеж.

Русло реки слабоизвилистое, берега русла низкие, заболоченные, поросшие осокой.

Дно песчано – илистое, встречаются редкие валуны и галька, устойчивое, сильно зарастающее водной растительностью. В 200 – 300 м ниже поста наблюдаются заторы льда. В период половодья и летне – осенних паводков в районе поста наблюдается переменная подпор от нижележащих озер. Пересыхания и замерзания не наблюдается.

Ниже д. Моровино в долине р. Оредеж имеются озеровидные расширения, аккумулирующие паводочный сток реки. Поэтому на рассматриваемом створе ежегодно кривые скоростей и расходов образуют петлю; ветви спада располагают левее ветвей подъема.

Четко выделяется уменьшение расхода воды в русловой части потока при начале пойменного стока, одновременно растет сток на пойме. При достижении

максимальных уровней наблюдается выравнивания русловых и пойменных скоростей, но пойменный расход больше, чем русловой за счёт большей площади водного сечения.

Уменьшение скоростей русловой и общей после выхода на пойму воды объясняется взаимодействием руслового и пойменного потоков, вызывающим длительное сопротивление.

Створ относятся к IV типу взаимодействия потоков: русловой и пойменный имеют геометрические оси, сходящиеся под углом около 50° .

4.2 Анализ результатов сравнения расчетных значений коэффициента шероховатости с табличными

В таблице 4.1 приведены табличные значения коэффициента шероховатости « n » (по ряду авторов) и расчетные значения « n » для створа р. Луга – ст. Толмачева за 2 года. Методика расчёта изложена в начале главы.

Различными авторами разработаны таблицы для продления значений « n » по описанию сопротивлений русла и поймы.

Все они не дают идентичного представления значений « n » для однозначных описаний сопротивлений. Не учитывается влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Все авторы отмечают зависимость коэффициента « n » от глубин, однако только у Л.Л. Лиштвана она дана в явном виде и отражает слабое уменьшение « n » с глубиной.

В таблице 4.2 приведены отклонения параметра « n », рассчитанного по формуле Павловского, от табличных его значений. Коэффициент шероховатости « n » рассчитан отдельно для русла до выхода воды на пойму и после выхода на пойму, отдельно для поймы при низких уровнях (до $H_{\text{бровка}}$ прируслового вала) и при высоких уровнях (выше $H_{\text{бровка}}$) затопления поймы.

В целом « n » с увеличением глубины уменьшается, но уменьшение наиболее интенсивно лишь до уровня $H_{\text{бровка}}$ вала, а при слиянии потоков русла и поймы уменьшение либо прекращается, либо « n » слабо возрастает. Это

относится к пойменным потокам. Отличается лишь кривая $n = f(H)$ для «центральной» поймы, которая с повышением уровня бровки вала возрастает до 0,13, в то время, как для других частей поймы при наивысшем уровне « n » находится в пределах 0,045 – 0,065. Это можно объяснить повышенной шероховатостью участка, а также тем, что именно здесь проходит граница руслового и пойменного потоков.

Из расчёта получилось, что кривая $n = f(H)$ для русла с увеличением глубины не уменьшается, а увеличивается в результате того, что скорость в русле с увеличением глубины, превышающей $H_{\text{бровки вала}}$ уменьшается. В таблицах не учтено взаимодействие руслового и пойменного потоков, поэтому в них с увеличением глубин « n » уменьшается.

Для русла до выхода воды на пойму наилучшие результаты получены по таблице определения « n » Лиштвана - отклонение 0%. После выхода воды на пойму лучшие результаты получены по таблице Срибного – 9,1%.

Наибольшее отклонение получено по таблице Чоу – 37,2% до выхода воды на пойму, после – Бредли – 43,7%.

Для поймы до уровня бровки прируслового вала наибольшее отклонение даёт таблица Васильевой – 67,6%.

Наибольшее отклонение после слияния пойменных потоков также получено по таблице Васильевой – 237%.

К сожалению, недостаточно данных измерений уклонов при слиянии русловых и пойменных потоков и вообще на пойменных створах, это не позволяет вывести средние значения отклонений из многих вычисленных.

Таблица 4.1 – Значения коэффициентов шероховатости по ряду авторов

Река – пункт	Характеристика русла		Значения коэффициентов «n»							
			Расчетные значения		Табличные значения					
			1976 г	1977 г	По Бредли	по Чоу	по Агроскину	по Лиштвану	по Срибному	по Васильевой
р. Луга – ст. Толмачево	Пойма левого берега до $H_{рб}$	Пастбище без кустов, рельеф немного всхолмленный, имеются старицы. Трава низкая.	0,040	0,076	0,035	0,035	-	0,067	0,040	0,040
	после $H_{рб}$		0,025	0,035	0,030	0,025	-	0,040	0,040	0,040
	Пойма «центральная» до $H_{рб}$	Между руслом и береговым валом.	0,060	0,050	0,060	0,060	-	0,067	0,065	0,118
	после $H_{рб}$	Редкие кусты, затопленные при ГВВ, отдельные деревья. Рельеф неровный	0,030	0,093	0,050	0,050	-	0,114	0,065	0,118
	Пойма правого берега до $H_{рб}$	Луг с отдельными кустами, затопляемыми при ГВВ. Имеются старицы, отдельные деревья. Рельеф неровный	0,061	0,070	0,060	0,060	-	0,114	0,065	0,118
	после $H_{рб}$		0,035	0,050	0,050	0,035	-	0,067	0,065	0,118
	Русло до выхода воды на пойму	В меру извилистое, имеются отмели и бочаги, дно песчаное, кое-где – галька. Кустов по берегам нет	0,035	0,035	0,0475	0,048	0,040	0,035	0,040	-
	После выхода воды на пойму		0,045	0,055	0,031	0,045	0,040	0,032	0,050	-
	Среднее			0,040	0,045	0,0392	0,046	0,040	0,034	0,045

Таблица 4.2 – Значения и отклонения параметра «*n*», рассчитанного по формуле Павловского, от табличных его значений

Река – пункт	Характеристика	$n_{\text{ср расч.}}$	отклонение $\frac{\Delta n}{n_{\text{расч}}}$, %					
			По Бредли	по Чоу	по Агроскину	по Лиштвану	по Срибному	по Васильевой
р. Луга – ст. Толмачево 1977 г I вариант	русло до выхода воды на пойму	0,035	-34,3	-37,2	-14,3	0,0	-14,3	-
	после	0,055	43,7	18,2		41,8	9,1	-
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,076	53,9	53,9	-	11,8	47,4	47,4
	левобер. после $H_{\text{рб}}$	0,035	14,3	28,6	-	-14,3	-14,3	-14,3
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,050	-20,0	-20,0	-	-34,0	-30,0	-136
	«центр.» после $H_{\text{рб}}$	0,093	46,3	62,4	-	22,6	30,1	-27
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,070	14,3	14,3	-	-58,6	7,2	-67,6
	правобер. после $H_{\text{рб}}$	0,050	0,00	30,0	-	34,0	-30,0	-136
р. Луга – ст. Толмачево 1976 г I вариант	русло до выхода воды на пойму	0,035	-34,3	-37,2	-14,3	0,00	-14,3	-
	после	0,045	31,1	0,00	11,1	28,9	-11,1	-
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,040	12,5	12,5	-	-67,5	0,00	0,00
	левобер. после $H_{\text{рб}}$	0,025	-20,0	0,00	-	-60,0	-60,0	-60,0
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,060	0,00	0,00	-	-90,0	-8,3	-97
	«центр.» после $H_{\text{рб}}$	0,030	-66,7	-16,7	-	-123	-117	-267
	пойма до $H_{\text{рб}}$	0,061	1,64	1,64	-	-87,0	-6,6	-93
	правобер. после $H_{\text{рб}}$	0,035	-42,8	0,00	-	-92,0	-86	-237

4.3 Вес пойменной составляющей в общем расходе воды

В таблице 4.3 приведены сведения о максимальных расходах воды в русле и на пойме по 5 постам, расположенных на реках Ленинградской области.

Как видно из таблицы, доля пойменного расхода колеблется от 12,0 до 68,8%.

Но эти данные не являются равнообеспеченными, поэтому они могут быть использованы как ориентировочные.

Из анализа имеющихся материалов (Таблица 4.3) вытекает, что с ростом уровня воды вес пойменной составляющей в общем расходе воды систематически возрастает. Однако тенденция роста зависит от типа поймы, ее размеров, взаимного расположения геометрических осей поймы и русла, определяющих в конечном счёте положения динамических осей и других факторов.

Малая доля пойменного расхода от общего в максимальных уровнях наблюдается на посту р. Луга – д. Воронино – 12,4%. Это объясняется большим зарастанием поймы, т.е. большой шероховатостью дна поймы и недостаточной глубиной.

Для р. Луга – г. Луга большую роль играет гидротехническое сооружение – мост через реку ниже водпоста. По пойме проходит насыпь автомобильной дороги, а водопроектной отверстия расположены напротив русла. Поэтому доля пойменного расхода очень мала – 12,0%.

Для р. Луга – ст. Толмачева, р. Тигода – ст. Любань и р. Ордеж – д. Моровино доля пойменного расхода соответственно 60,5%, 63,6% и 66,2%.

На рисунке 4.1 представлены кривые зависимости $\frac{Q_{п}}{Q_{р}+Q_{п}} = f(H')$ и $\frac{Q_{п}}{Q_{р}+Q_{п}} = f\left(\frac{h_{р}}{h_{рб}}\right)$.

На них нанесены данные для расчетных пунктов. Рассмотрим рисунок 4.1 – Б.

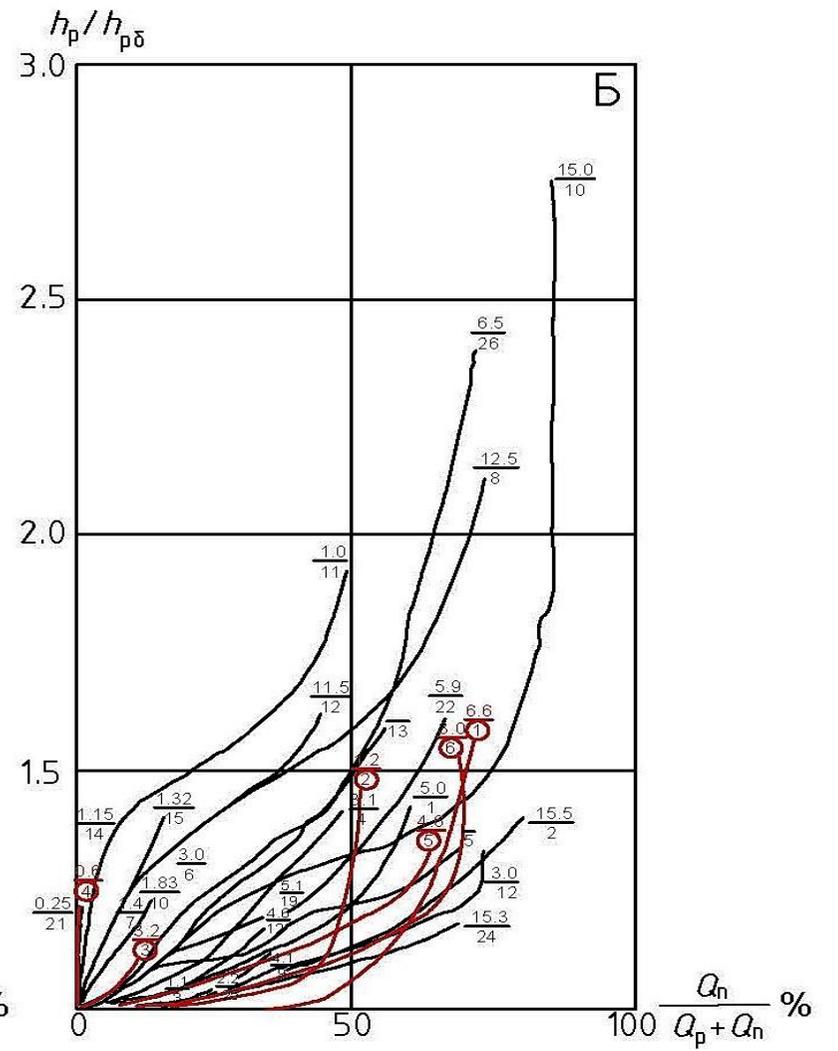
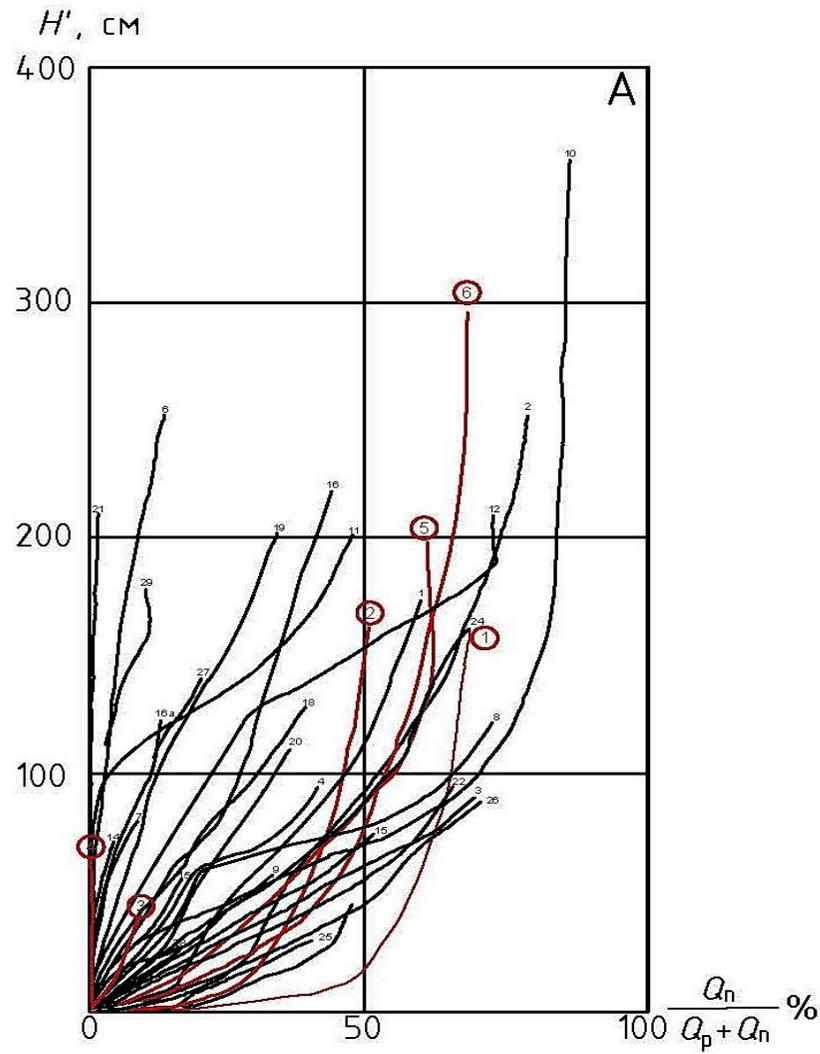


Рисунок 4.1 – Кривые зависимости: А – $\frac{Q_n}{Q_p+Q_n} = f(H')$; Б – $\frac{Q_n}{Q_p+Q_n} = f\left(\frac{h_p}{h_{p6}}\right)$. 1 – р. Луга – ст. Толмачево, 1977 (I вариант); 2 – р. Луга – ст. Толмачево, 1977 (II вариант); 3 – р. Луга – д. Воронино, 1966 г, 4 – р. Луга – г. Луга, 1966 г; 5 – р. Тигода – ст. Любань, 1966 г; 6 – р. Ордеж – д. Моровино, 1966 г

К первой группе кривых, характеризующихся замедленным ростом пойменных расходов, относится р. Луга – г. Луга. Русло здесь хорошо разработано, пойма небольшая, оси потоков параллельны, течение на пойме слабое.

Таблица 4.3 – Сведения о максимальных расходах воды в русле и на пойме

Река – пост	Год	Уровень, см	Расход воды, м ³ /с			$\frac{Q_{п}}{Q_{р}+Q_{п}}$, %
			$Q_{р}$	$Q_{п}$	$Q_{р} + Q_{п}$	
р. Луга – ст. Толмачево	1976	428	78,8	119	198	60,0
		I вариант	426	76,9	118	195
II вариант		428	118	80,0	198	40,4
		426	115	79,9	195	40,9
I вариант	1977	448	82,5	128	210	61,0
		498	85,5	170	256	66,4
532		91,0	201	292	68,8	
II вариант		448	121	89,2	210	42,5
		498	133	123	256	48,1
		532	146	146	292	50,0
р. Луга – д. Воронино	1966	372	55,9	8,40	64,3	12,4
		386	69,7	4,70	74,4	6,31
		400	79,0	8,50	87,5	9,72
р. Луга – г. Луга	1966	390	130	0,08	130	0,06
		406	148,9	0,10	149	0,07
		426	177	0,16	177	0,09
		447	208,7	0,26	209	12,0
р. Тигода – ст. Любань	1966	478	29,3	13,4	42,7	31,4
		592	35,3	61,6	96,9	63,6
		596	38,5	60,9	99,4	61,4
		609	44,5	64,5	109	58,7
		497	25,8	24,7	50,5	48,9
		430	30,2	6,60	36,8	17,9
р. Оредеж – д. Моровино	1966	426	120	65,0	185	35,1
		465	99,3	98,7	198	49,8
		562	110	204	314	65,0
		625	95,2	186	281	66,2
		642	113	208	323	64,4

Ко второй группе, характеризующейся наличием довольно широкой поймы ($\frac{B_{п}}{B_{р}} \geq 6 - 12$), относятся посты: р. Луга – ст. Толмачева (I вариант), р. Тигода – ст. Любань и р. Оредеж – д. Моровино.

Оси руслового и пойменных потоков здесь пересекаются под углами около 30° . Рост пойменной составляющей в % от общего расхода достигает предела при высоких уровнях воды.

Особо нужно отметить II вариант выделения пойменной составляющей р. Луга – ст. Толмачёво. $\frac{B_{п}}{B_{р}}$ для этого варианта составляет 1,2, а кривая относится по внешнему виду скорее ко 2-ой группе. Это объясняется неправильностью объединения потоков в левобережной пойме и русле.

Река Луга у д. Воронино (г/с №2) относится к промежуточной 3-й группе, только нет наблюдений при высоких уровнях воды над бровкой прируслового вала.

4.4 Анализ кривых зависимостей $\frac{n_{р}}{n_{рб}} = f(H')$; $\frac{n_{п}}{n_{рб}} = f(H')$ и $\frac{I}{I_{рб}} = f(H')$

По данным наблюдений были рассчитаны значения параметров « n » (по формулам Павловского и Маннинга) построены кривые их зависимости от уровней воды как для русловой $\frac{n_{р}}{n_{рб}} = f(H')$, так и для пойменной $\frac{n_{п}}{n_{рб}} = f(H')$ частей потока, где $n_{р}$, $n_{п}$ и $n_{рб}$ соответственно значения коэффициента шероховатости для русла, поймы и русла при уровнях затопления бровки; $H' = H - H_{рб}$, т.е. превышение уровня воды над отметкой прирусловых валов. Кривые $\frac{n_{р}}{n_{рб}} = f(H')$ могут быть использованы для анализа влияния пойменного потока на русловую при их слиянии.

В таблице 4.4 и на рисунках 4.2 – 4.4 представлены зависимости $\frac{n_{р}}{n_{рб}} = f(H')$; $\frac{n_{п}}{n_{рб}} = f(H')$ и $\frac{I}{I_{рб}} = f(H')$.

Результаты анализа кривых и данных приведенных в таблице показывает, что изменение значений $\frac{n_p}{n_{pb}}$ и $\frac{I}{I_{pb}}$ с ростом уровней определяются сопротивлениями и морфометрией поймы и русла. Рассматривая кривую $\frac{n_p}{n_{pb}} = f(H')$, можно отметить, что значение « n » после выхода воды поверх уровня бровки вала увеличиваются, что соответствует уменьшению скорости вследствие взаимодействия с пламенным потоком.

При повышении уровня идет увеличение скоростей, соответственно уменьшается значение « n » русла. Сопротивления пойменным потокам после выхода воды сверх бровки вала остаются примерно постоянными, наблюдается лишь некоторое малое уменьшение значений « n ». Но в «центральной» пойме скорости с возрастанием уровня уменьшаются, соответственно возрастает значение « n ». Это объясняется размером поймы; возможно, сказывается то, что этот отсек поймы расположен между основной поймой и руслом.

Анализ кривой уклонов $\frac{I}{I_{pb}} = f(H')$ позволяет сделать вывод, что с увеличением уровня наблюдается уменьшение уклона, что соответствует сужению долины.

Таблица 4.4 – Ординаты зависимостей $\frac{n_p}{n_{pb}} = f(H')$; $\frac{n_{п}}{n_{pb}} = f(H')$ и $\frac{I}{I_{pb}} = f(H')$

H_{pb} , см	H , см	H' , см	n_{pb}	n_p	$\frac{n_p}{n_{pb}}$	$n_{поймы}$			$n_{п}/n_{pb}$			I_{pb} , ‰	I , ‰	$\frac{I}{I_{pb}}$
						лев.	центр.	прав.	лев.	центр.	прав.			
р. Луга – ст. Толмачево, 1976 г, I вариант														
370	428	58	0,045	0,0468	1,04	0,026	0,0380	0,0309	0,58	0,85	0,69	0,025	0,022	0,88
	426	56		0,0430	0,96	0,024	0,0345	0,0278	0,54	0,77	0,62		0,018	0,82
II вариант														
370	428	58	0,031	0,033	1,07			0,0309			1,00	0,025	0,022	0,88
	426	56		0,0295	0,95			0,0276			0,89		0,018	0,82
р. Луга – ст. Толмачево, 1977 г, I вариант														
375	450	75	0,058	0,080	1,38	0,031	0,083	0,0490	0,54	1,43	0,84	0,045	0,041	0,91
	514	139		0,065	1,12	0,052	0,0943	0,0596	0,90	1,63	1,03		0,031	0,69
	532	158		0,0653	1,13	0,042	0,1317	0,0472	0,73	2,27	0,81		0,031	0,69
	498	123		0,0541	0,98	0,034	0,1285	0,0427	0,59	2,22	0,74		0,028	0,62
	448	73		0,0603	1,04	0,030	0,0935	0,0480	0,51	1,61	0,83		0,038	0,84
	389	14		0,0627	1,08	0,029	0,0334	0,0540	0,50	0,58	0,93		0,041	0,91

Продолжение таблицы 4.4

$H_{рб}$, см	H , см	H' , см	$n_{рб}$	n_p	$\frac{n_p}{n_{рб}}$	$n_{поймы}$			$n_{п}/n_{рб}$			$I_{рб}$, ‰	I , ‰	$\frac{I}{I_{рб}}$
						лев.	центр.	прав.	лев.	центр.	прав.			
II вариант														
375	450	75	0,036	0,0504	1,40			0,0500			1,39		0,041	0,91
	514	139		0,0610	1,69			0,0596			1,65		0,031	0,69
	532	158		0,0625	1,74			0,0473			1,31		0,031	0,69
	498	123		0,0517	1,44			0,0430			1,19		0,028	0,62
	448	73		0,0487	1,35			0,0480			1,33		0,038	0,84
	389	14		0,0336	0,93			0,0545			1,52		0,041	0,91

4.5 Анализ деформаций полей скоростей

4.5.1 Деформация полей скоростей в русловой части потока под влиянием пойменного

На посту р. Луга – г. Луга наблюдается третий тип взаимодействия руслового и пойменного потоков: оси потоков почти параллельны, происходит перемещение массы жидкости из поймы в русло, уменьшение пропускной способности русла невелико. Наблюдается увеличение средних и максимальных скоростей потока с ростом уровня воды, и при выходе воды на пойму, при H_{max} отмечена наибольшая скорость руслового потока. Происходит смещение динамической оси потока при высоких уровнях в сторону, противоположную пойме.

На посту р. Луга – д. Воронино наблюдается второй тип взаимодействия руслового и пойменного потоков: перемещение масс жидкости из русла на пойму. Геометрические оси потоков непараллельны, составляют угол около 140° , т.е. расходятся.

Не имеется данных наблюдений при высоком уровне над бровкой прируслового вала. При уровне 400 см над «0» графика $H' = 35$ см. Пойменный поток слаб из-за густых кустов, которыми поросла пойма. Поэтому при $H_{max} = 400$ см средние максимальные скорости в русловом потоке наибольшие; при снижении уровня до меженного падают и скорости (до $V = 0,06$ м³/с).

При высоких уровнях и выходе воды на пойму происходит смещение динамической оси руслового потока в сторону поймы. Объясняется тем, что правый крутой берег оказывает большее сопротивление, чем почти стоячая вода на пойме.

При низких уровнях, наоборот, левый пойменный берег характеризуется повышенной шероховатостью, скорости смещаются в сторону крутого правого берега, т.е. взаимодействие руслового и пойменного потоков очень слабое.

Створ р. Луга – ст. Толмачёво находится в сложных морфологических условиях. Наблюдается схождение руслового и пойменного потоков под углом около 30° и сужение долины. При этом пойма двухсторонняя, прирусловой вал высок и удалён от берега русла.

При анализе деформации полей скоростей наблюдается уменьшение средних и максимальных скоростей по мере роста уровня воды выше уровня выхода на пойму.

Смещение динамической оси руслового потока выяснить не удалось. В межень измерения расходов производится на другом створе, поэтому меженного поля скоростей нет.

По типу взаимодействия этот створ можно отнести к III и IV типу взаимодействия.

К III типу взаимодействия руслового и пойменного потоков относятся пост р. Тигода – ст. Любань.

Пойменный и русловой потоки имеют геометрические оси, пересекающиеся под углом $30 - 40^\circ$.

Наивысшие максимальные скорости наблюдаются в русле при средних меженных уровнях. По мере возрастания уровней при выходе воды на пойму средние и максимальные скорости в русле снижаются. Смещение динамической оси происходит в сторону поймы, где образуется сплошной выравненный поток.

К IV типу взаимодействия потоков относятся и створ р. Оредеж – д. Моровино. Потоки имеют геометрические оси, сходящиеся под углом около 50°.

Так же, как и в предыдущем случае, по мере повышения уровня воды происходит уменьшение средних и максимальных скоростей, пока русловые и пойменные скорости не выравняются, затем наблюдается единый поток с выравненными скоростями по глубине и ширине потока.

В таблице 4.5 и рисунках 4.2 – 4.4 приводятся сведения о зависимости $\frac{V_p}{V_{pб}} = f\left(\frac{h_p}{h_{pб}}\right)$ при максимальных уровнях воды.

Таблица 4.5 – Ординаты зависимости $\frac{V_p}{V_{pб}} = f\left(\frac{h_p}{h_{pб}}\right)$ при максимальных уровнях ВОДЫ

река – пункт	$h_p/h_{pб}$	$V_p/V_{pб}$
р. Луга – ст. Толмачево, $\alpha = 30^\circ$	1,24	0,77
	1,37	0,74
	1,47	0,80
р. Луга – д. Воронино, $\alpha = 130 - 140^\circ$	0,97	1,11
	1,03	1,28
	1,08	1,36
	1,02	1,11
р. Луга – г. Луга, $\alpha = 0^\circ$	1,00	1,01
	1,06	1,08
	1,09	1,14
	1,14	1,20
	1,17	1,36
р. Оредеж – д. Моровино, $\alpha = 50^\circ$	1,03	0,85
	1,27	0,51
	1,42	0,37
	1,38	0,44
	1,51	0,34
р. Тигода – ст. Любань, $\alpha = 30 - 40^\circ$	1,10	0,81
	1,23	0,73
	1,20	0,79
	1,31	0,81
	1,22	0,58
	1,25	0,62
	1,04	0,94

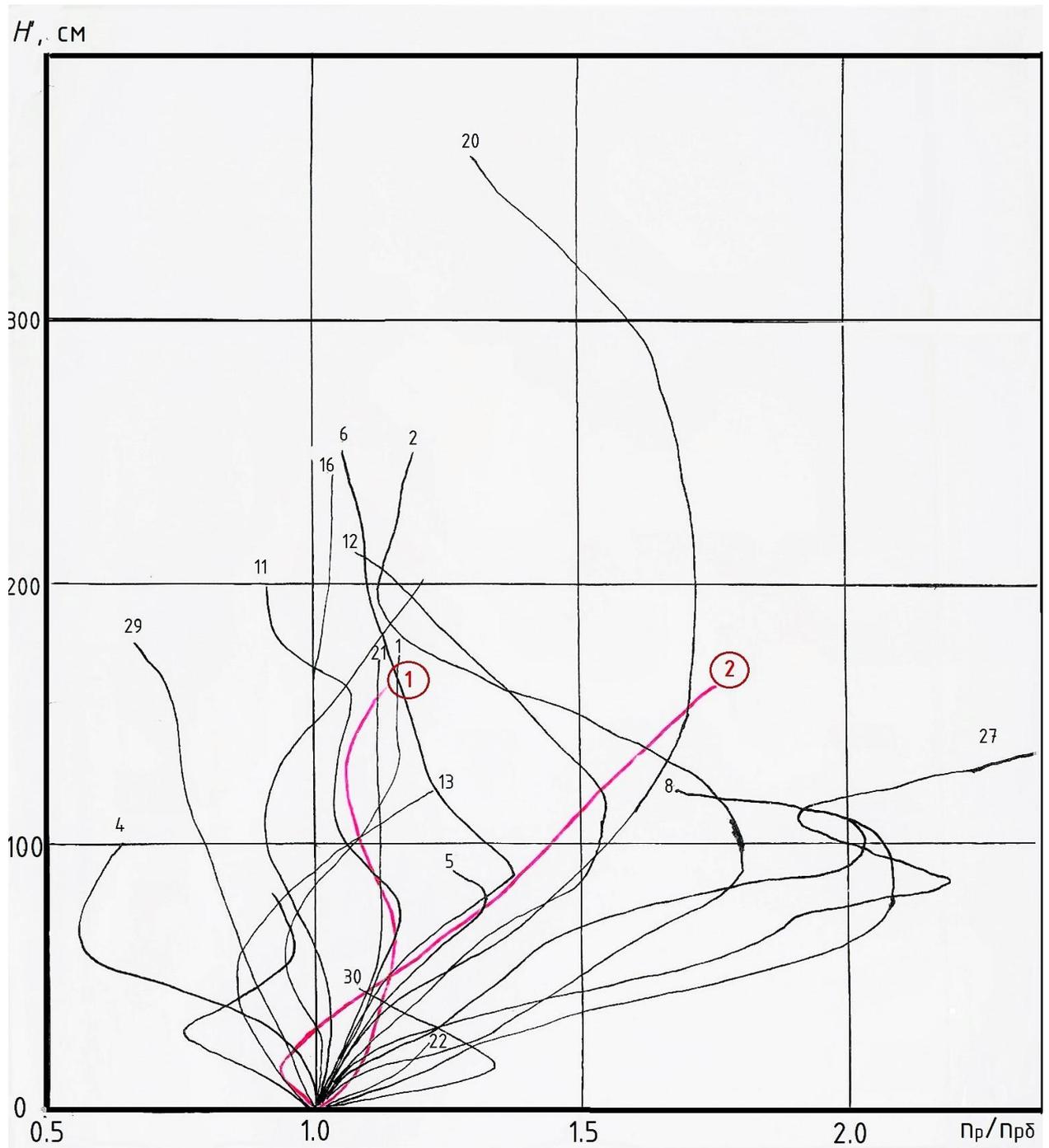


Рисунок 4.2 – Кривая зависимости $\frac{n_p}{n_{p\delta}} = f(H')$

1 – р. Луга – ст. Толмачево, 1977 г, I вариант;

2 – р. Луга – ст. Толмачево, 1977 г, II вариант

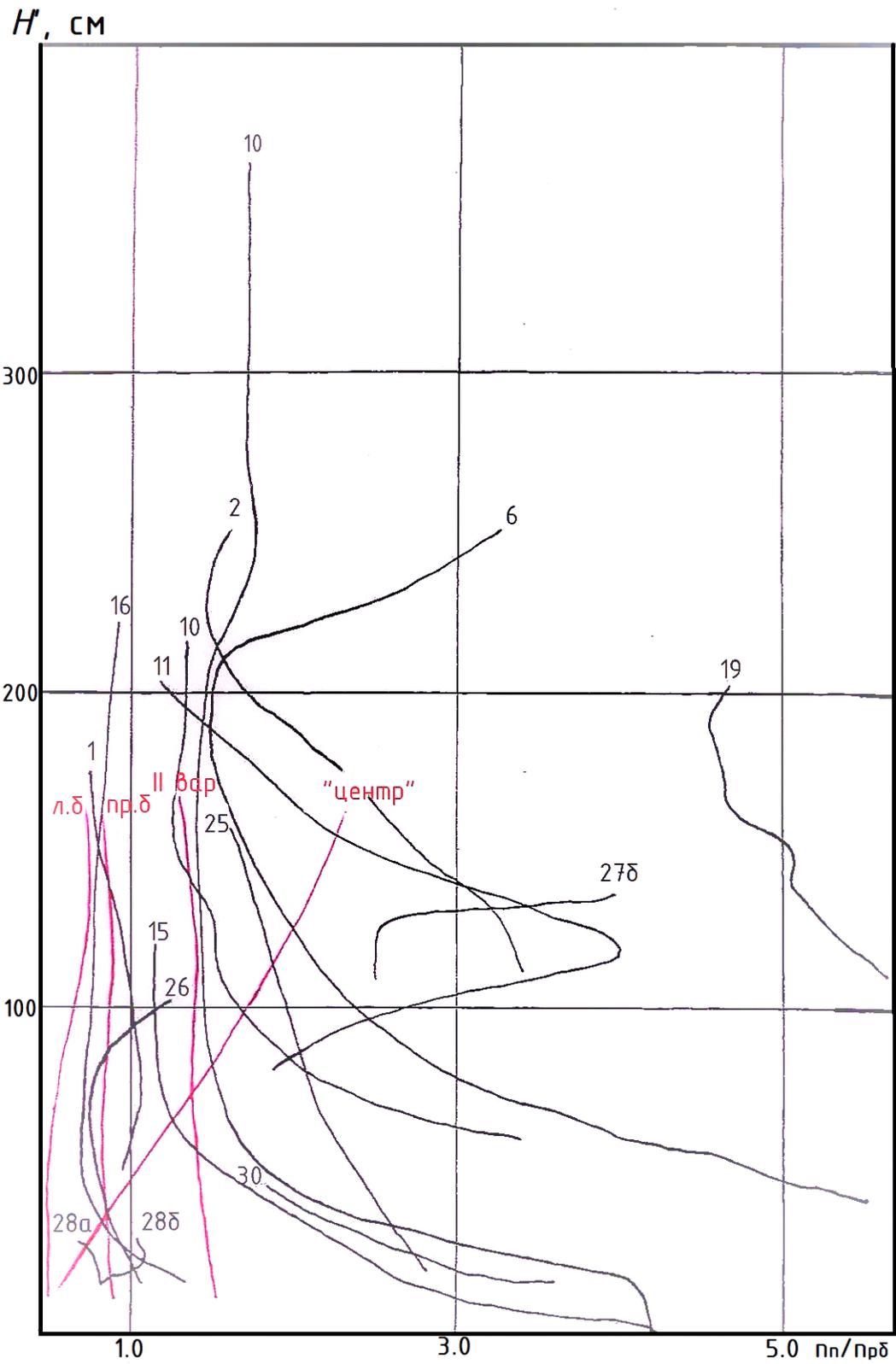


Рисунок 4.3 – Кривая зависимости $\frac{n_n}{n_{pb}} = f(H')$

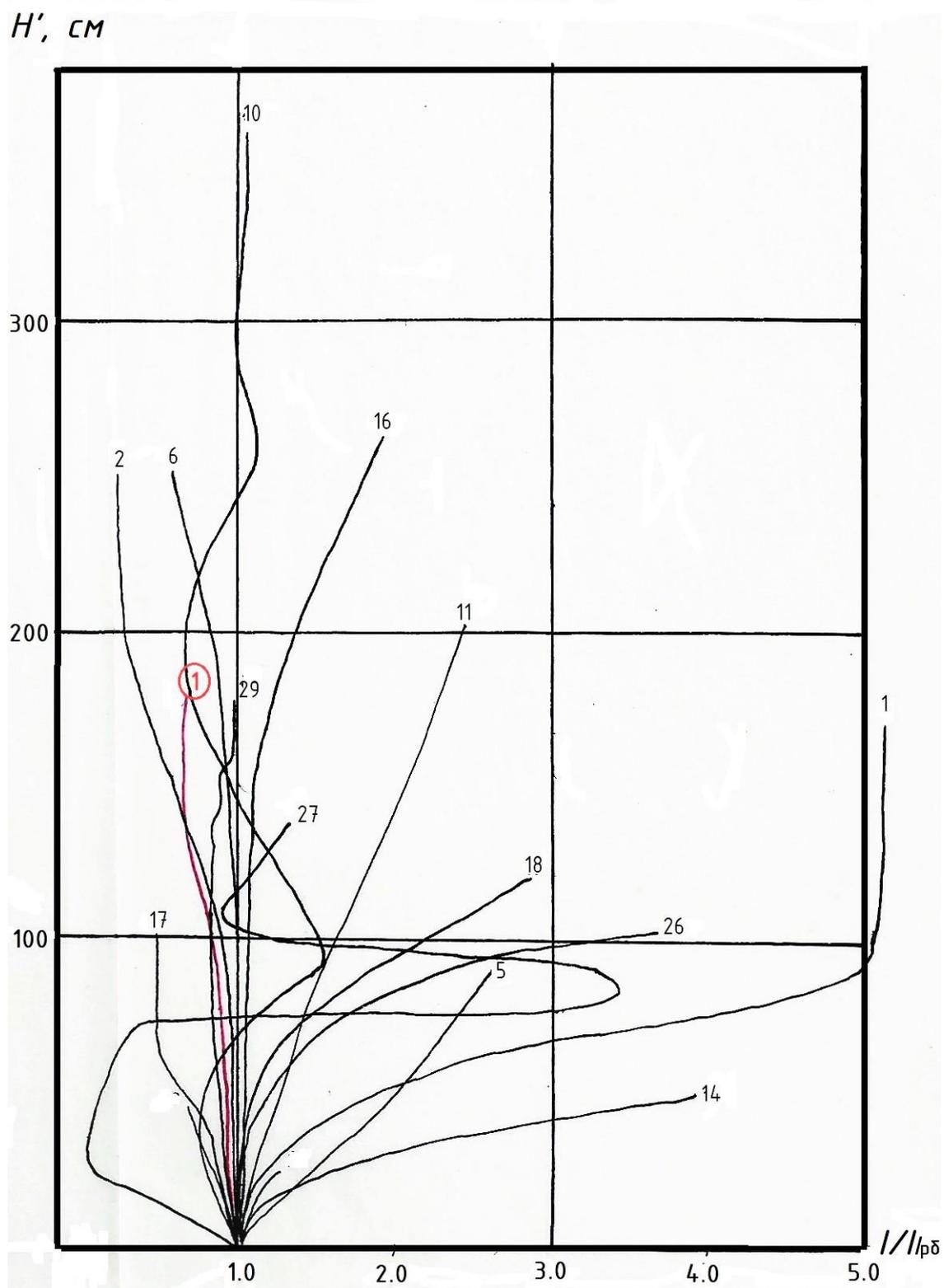


Рисунок 4.4 – Кривая зависимости $\frac{I}{I_{p\delta}} = f(H')$

Прослеживается зависимость кривых от морфометрии пойм. Чем больше угол пересечения пойменной оси и оси руслового потока, тем более отклоняются кривые влево, т.е. тем меньше пропускная способность русла при слиянии потоков.

4.5.2 Изменение пойменных скоростей под влиянием руслового потока

На наших примерах I и II типов взаимодействия русловых и пойменных потоков анализ изменения пойменных скоростей под влиянием руслового потока перевести нельзя. Можно лишь отметить, что по мере поднятия уровня воды уменьшается площадь мертвого пространства на пойме.

На примерах взаимодействия III и IV типов можно установить, что под воздействием руслового потока изменяются поля скоростей пойменного потока. Во-первых, по мере уменьшения русловых скоростей, увеличиваются средняя и максимальная скорости на пойме. Во-вторых, по мере увеличения уровня, т.е. чем больше взаимодействие руслового и пойменного потоков, тем больше смещаются динамические оси пойменных потоков в сторону берега, от руслового потока. Это вызвано дополнительным сопротивлением при взаимодействии потоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы нами получены следующие выводы и рекомендации.

1. На всех исследуемых реках отмечен эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, причём объекты отобраны таким образом, что на них наблюдаются все 4 типа взаимодействия русловых и пойменных потоков.

2. На постах СЗУГМС неудовлетворительно поставлены наблюдение за уклоном свободной поверхности воды, особенно в паводочный период. Наблюдение за уклоном свободной поверхности потоков русла и поймы вообще отсутствуют. Так, из всех постов Ленинградской области оказалось возможным выбрать лишь один пойменный створ, на котором производились бы измерения уклона в паводок, а именно: р. Луга – ст. Толмачёво. Поэтому расчёт коэффициентов шероховатости и их анализ выполнен только по этому объекту.

3. Доля стока, пропускаемого поймой при наивысших уровнях затопления, колеблется от 12,0% до 68,8%. Это объясняется как отличием расчетных уровней затоплением поймы, так и их относительной шириной, и шероховатостью. Действительно, для р. Луга – д. Воронино $\frac{Q_p}{Q_p+Q_{п}}$ имеет максимальное значение 12,4% при относительной ширины поймы 3,2 км. Это происходит вследствие того, что на пойме густая растительность (кусты). Уровни же над бровкой прируслового вала не более 35 см.

Для р. Луга – ст. Толмачева доля пойменного стока составляет 68,8% при $H' = 158$ см.

4. Для поста р. Луга – ст. Толмачёво на кривых зависимостей расходов и скоростей от уровня воды в паводочный период обнаруживается четко выраженная петля, причём ветвь, соответствующая подъему уровня расположена левее ветви спада. Такой характер расположения ветвей

объясняется большой аккумулярующей емкостью поймы. Наши расчёты показали, что объем воды на пойме на участке длиной 9 км, средней шириной 0,8 км при максимальном уровне воды и средней глубине на пойме 3 м примерно соответствует разности объемов воды на спаде и на подъёме поводка.

На р. Оредеж – д. Моровино также наблюдаются ветви подъема и спада кривых зависимостей $Q = f(H)$ и $V = f(H)$, однако их расположение является обратно аналогичным на р. Луге – ст. Толмачёво. Это объясняется аккумулярующей способностью озеровидных расширений долины реки Оредеж ниже водпоста. Цифровоц расчёт провести не представляется возможным. К сожалению, наблюдение за уклоном здесь не ведутся, поэтому нельзя исследовать поведение кривой зависимости $I = f(H)$.

5. Характер деформации поля скоростей руслового отсека потока под воздействием пойменного свидетельствует, что он соответствует III типу взаимодействия потоков.

Пример: р. Луга – г. Луга относятся к III типу взаимодействия потоков, уменьшении средней максимальной скоростей при слиянии руслового и пойменного потоков не наблюдается. Происходит смещение динамической оси потока русла в сторону, противоположную пойме. У рек (постов) IV типа – р. Тигода – ст. Любань, р. Оредеж – д. Моровино, р. Луга – ст. Толмачево наблюдается уменьшение скоростей при слиянии руслового и пойменного потоков на 40 – 50%.

6. Анализ и сравнение данных расчетных значений коэффициента шероховатости « n » по р. Луга – ст. Толмачево, как для русла, так и для поймы, с табличными, позволяет сделать вывод, что исследованные таблицы (Бредли, Чоу, Агроскина, Срибного, Васильевой) дают неудовлетворительные результаты. Так, отклонения для русловой части потока достигает 37,2% по таблице Чоу (до выхода воды на пойму) и 43,7% по таблицам Бредли (после выхода воды на пойму).

Наименьшие отклонения, получены по таблице Лиштвана – 0,1% – до выхода на пойму, и после – по таблице Срибного – 9,1%.

Для пойменной части потока наибольшее отклонения при больших глубинах и скоростях течения получены по таблице Васильевой (до 267%), наименьшее – таблицы Чоу и Брэдли.

7. Прделанный анализ и расчёты показывают необходимость совершенствования методики измерения и расчетов расходов и скоростей потока на реках с поймами; в частности, представляется наиболее перспективным усовершенствование методики предложенной Д.Е. Скородумовым, основанной на уравнении движения потока с переменной массой. Но учитывая, что ее внедрение влечет существенное увлечение полевых работ, в настоящее время целесообразно также развитие методики основанной на формуле Шези; в частности, уточнение таблиц для определения «*n*» как для русла, так и для поймы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шанцер Е.В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. Труды ГИН АН СССР. Вып. -М.: Наука, 1966. 240 с.;
2. Ламакин В. В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. 1948. Т. 2 (42). С. 154–187;
3. Лаврушин Ю.А. Аллювий рек Субарктического пояса и перигляциальных областей материковых оледенений. Москва: Издательство Академии наук СССР, 1963. — 266 с. — (Труды, вып. 87.);
4. Попов И. В., Гаврин Ю. С. Применение аэрофотосъемки к оценке процессов затопления и опорожнения речных пойм и развития пойменных течений. Тр. ГГИ, 1970, вып. 183, с. 4-26.;
5. Шанцер Е.В. Аллювий рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. Труды Ин-та геол. наук АН СССР. 1951, вып. 135 (55 геол. сер). - 275 с.;
6. Ламакин В. В. О динамических особенностях аллювиальных отложений.— Докл. АН СССР, 1947, т. 57, с. 65-68.;
7. Попов И.В., Кочаненкова Н.П. О морфологических особенностях речных пойм Текст./ Попов И.В. // Труды ГГИ. Вып. 190. - Л.: Изд. Гидрометеоиздат, 1972. - С. 19 — 36. ;
8. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия и ее бассейне Текст./ Маккавеев Н.И. М.: Изд. АН СССР, 1955. ;
9. Антроповский В.И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие Текст./ Антроповский В.И.// Труды ГГИ. Вып. 169. -Л.:Изд. Гидрометеоиздат, 1969. - С. 34-86. ;
10. Барышников Н.Б. Взаимодействие руслового и пойменного потоков. Конспект лекций. — Л.: ЛПИ, 1984. - 50с.;

- 11.Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Труды ГГИ, Вып. 128, 1965.;
- 12.Павловский, Н. Н. Гидравлический справочник: пособие при гидравлических расчетах. - Л. : Путь, 1924. - 192 с.;
- 13.Дидковский М.М., Родионов И.А. Сопротивление движению воды в больших земляных каналах. Изд. АН УССР, Киев, 1956, 80 с.;
- 14.Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 366с.;
- 15.Железняков Г.В. Теория гидрометрии. 2-ое изд. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 344с.;
- 16.Барышников Н.Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды// Тр. ЛГМИ. Вып.25. – Л., 1967. – С. 41-49.;
- 17.Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды// Тр. ГГИ. Вып.128. – Л., 1968. – С. 3-96.;
- 18.Великанова З.М., Ярных Н.А. Натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье [текст].-Труды ГГИ, 1970, вып. 183, с. 33—53.;
- 19.Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории) [текст].- М.: Госфизматгиз. 1958. 395 с. 20.;
20. Великанов М.А. Русловой процесс [текст].- М.: Физматгиз, 1958. – 396 с.;
- 21.Попов И.В. Типизация пойм в связи со строительным проектированием.- В кн.: Движение наносов в открытых руслах. М., Наука, 1970, с. 28-32.;
- 22.Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1969, 416 с.;
- 23.Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. Монография. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. – 158 с.;

24. Усачёв В. Ф. Применение последовательных аэрофотосъемок для исследования процесса затопления пойм. Труды ГГИ, вып. 190, 1972, с.57-71;
25. Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 340с.;
26. Соболев С.С. Учение о пойме как основа для изучения геоморфологии речных долин и стратиграфии речных террас. Почвоведение, № 5 – 6, 1935 г.;
27. Дмитриев А. М. Луга Холмогорского района: естественные условия холмогорского скотоводства / А. М. Дмитриев. – СПб., 1904. – 96с.;
28. Срибный М. Ф. Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов. – М. – Л.: Гострансиздат, 1932. – 148 с;
29. Барышников Н.Б., Иванов Г.В. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей на русловые процессы. Сборник: Водный транспорт леса, выпуск 2. Красноярск, 1974, с. 119;
30. Поляков, Б.В. Гидрологические исследования Нижней Волги : Вып.Х / Б.В. Поляков . – М.: Госстройиздат, 1938 . – 159 с;
31. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. 2-ое изд. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 312с;
32. Карасев И.Ф. Распределение продольных скоростей течения в поймах и руслах рек. Тр. ГГИ, 1973, вып.202, с.3-37;
33. Барышников Н. Б. Расчет минимальных транзитных глубин, на судоходных реках.— Тр. ГГИ, 1959, вып. 69, с. 138— 148;
34. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 1971.
35. Горецкий Г.И. Формирование долины Волги в раннем и среднем антропогене. -М.:Наука,1966. 410 с;
36. Усачев В. Ф. Анализ изменения уровней воды для оценки процессов затопления и опорожнения многорукавных пойм. — Тр. ГГИ, 1972, вып. 195, с. 63 – 76;

37.Альтшуль А.Д., У-Вин-Тейн Сравнение формул без коэффициента шероховатости для определения средней скорости течения воды в реках // Гидротехническое строительство, 1973, № 1, с. 41-42.;

38.Урываев Л.А., Лыло В.М. Методические ошибки в изучении гидравлического режима рек Дальнего Востока. Информ.письмо Хабаровск, УГМС ДВ, 1963, с.34-40.;

39.И. Б. Барышников. Влияние поперечных перемещений масс жидкости на пропускную способность русел с поймами, Ленинград, 1976 г;

40.Копалиани З.Д., Гендельман М.М. (1989) Русловой процесс и гидравлические сопротивления. В сб. "Проблемы современной гидрологии", Л.:Гидрометеиздат, с. 288-304.