

Графоаналитический метод прогноза максимальных уровней воды в период половодья для некоторых пунктов на р. Тобол

Существует несколько подходов к разработке методов прогнозов гидрологических явлений. Графический – заключается в том, что все зависимости между аргументами и функцией выполняются и в дальнейшем используются в виде графиков. С появлением вычислительной техники применяется так называемый физико-статистический подход, когда аргументы отбираются путем перебора из числа потенциально возможных в линейных уравнениях – метод корреляции (регрессионный анализ).

Позже получили распространение концептуальные модели с определением их параметров, представляющие формирование стока в аналитическом виде.

Каждый из перечисленных выше подходов имеет как свои достоинства, так и свои недостатки.

В данной работе объединены достоинства графического метода и аналитического представления его результатов. Для этого предварительно построенные графические зависимости аппроксимировались аналитическими квадратичными уравнениями и путем оптимизации (подбором при решении прямой задачи) определялись параметры этих уравнений.

Графические зависимости обладают тем достоинством, что при их построении учитываются априорные знания специалиста о данных, используемых при разработке метода, и о предполагаемом виде самих зависимостей. При этом удается избавиться от больших ошибок в данных и провести линии взаимосвязей по центрам тяжести точек в поле графика с учетом особенностей формирования стока в отдельные годы.

Климат бассейна р.Тобол относится к резко континентальному. В течение года осадков выпадает от 300 до 400 мм. Это конечно затрудняет разработку метода прогноза объема весеннего половодья и его максимального уровня и снижает точность прогнозов, особенно, если иметь в виду, что 80% осадков приходится на теплый период года.

Континентальный климат определяет холодные, малоснежные зимы. К северу, вниз по течению Тобола к п.Курган количество снега возрастает, а его максимальные величины наблюдаются, как правило, в марте, в многолетнем разрезе выше п.Курган – от конца февраля до начала апреля.

Погода зимой довольно ветреная, что способствует перераспределению снежного покрова с полей к опушкам леса и в овраги. Температура воздуха летом может подниматься почти до 40°C , а зимой опускаться до -40 – -45°C . В связи с этим глубина промерзания почвы зимой чаще всего достигает более 60 см в среднем по бассейну.

Большая половина бассейна р.Тобол выше п.Курган представляет собой равнину с преобладанием высот 100-200 м. Края долины реки поднимаются до высоты 500-1500 м.

Максимальные уровни воды в п. Курган приходятся на период половодья. За 76 лет наблюдений максимальный уровень воды колебался от 140 до 1087 см. В последние 15 лет максимальный уровень более 1000 см был только в 1994 г. Таким образом, амплитуда колебаний максимальных уровней за столетие – 950 см, т.е. почти 10 м.

Ниже п.Курган расположен гидропост в п. Ялуторовск, где амплитуда изменения максимальных уровней воды за многолетний период – около 760 см (от 212 см до 969 см). Причем максимальные уровни воды в п. Курган и п.Ялуторовск наблюдаются по годам не синхронно, т. к. на гидрограф нижележащего створа накладывается гидрограф воды промежуточных притоков.

Следующим пунктом наблюдений, расположенным ниже по течению Тобола является п. Иевлево. Максимальная величина уровня воды в Иевлево из ряда максимальных за многолетний ряд периода половодий (более 75 лет) равняется 1001 см, а минимальная из этого ряда наблюдений – 385 см, т.е. амплитуда колебаний – 725 см. Снижение многолетней

амплитуды максимальных уровней воды вниз по течению Тобола вызывается трансформацией волны половодья при ее движении по руслу.

Максимальные величины из ряда максимальных уровней воды в различных пунктах наблюдаются в различные годы, а минимальные из них практически в одни и те же годы, даже на боковых притоках. На р. Туре, впадающей в Тобол между п.Ялуторовск и п.Иевлево, минимальный по величине пик наблюдался в том же году что и в п.Иевлево. Объяснение этому находится в более распространенном на больших площадях явлении - сочетании малоснежной зимы с засушливой осенью, т.е. сухие осени и малоснежные зимы занимают большие территории и имеют соответственно меньший коэффициент неравномерности распределения по территории. Многоводные же половодья образуются на меньших по площади территориях, а охват многоводьем больших пространств, хотя и возможен, но имеет меньшую вероятность осуществления, поэтому и наблюдаются на разных притоках в различные годы.

Исследования показали, что наиболее существенными факторами стока в бассейне р. Тобол выше п. Курган являются запасы воды в снежном покрове и увлажнение почвы (влагоемкость бассейна). В связи с этим они были приняты в виде аргументов при построении прогностических зависимостей.

Попытки использовать в прогностических зависимостях глубину промерзания почвы не предпринимались, т.к. она, во-первых, измеряется с помощью мерзлотометров, показания которых могут отличаться от фактической льдистости почвы, а ведь именно эта характеристика является наиболее показательной при прогнозировании объема половодья; во-вторых, как говорилось выше, она в бассейне Тобола практически всегда больше 60 см, т.е. ее влияние на формировании стока почти не сказывается.

Обобщенная система уравнений для расчета стока воды за половодье в створе п.Курган имеет следующий вид :

$$\begin{aligned}
 Y &= 0,0746 (0,0011X S^2 + 0,018 + S) Z; & (1) \\
 Z &= \begin{cases} 0,0064 W^2 - 0,052W & \text{при } W \leq 50 \\ -0,004 W^2 + 1,1 W - 31,6 & \text{при } W > 50 \end{cases},
 \end{aligned}$$

где Y - слой стока, мм;

S - запасы воды в снежном покрове (максимальные), сложенные с осадками X за период половодья;

Z - множитель, способ вычисления которого приведен выше ;

W - показатель увлажнения бассейна (влагоемкость).

Графическая связь, которую аппроксимирует уравнение (1), приводится на рис.1.

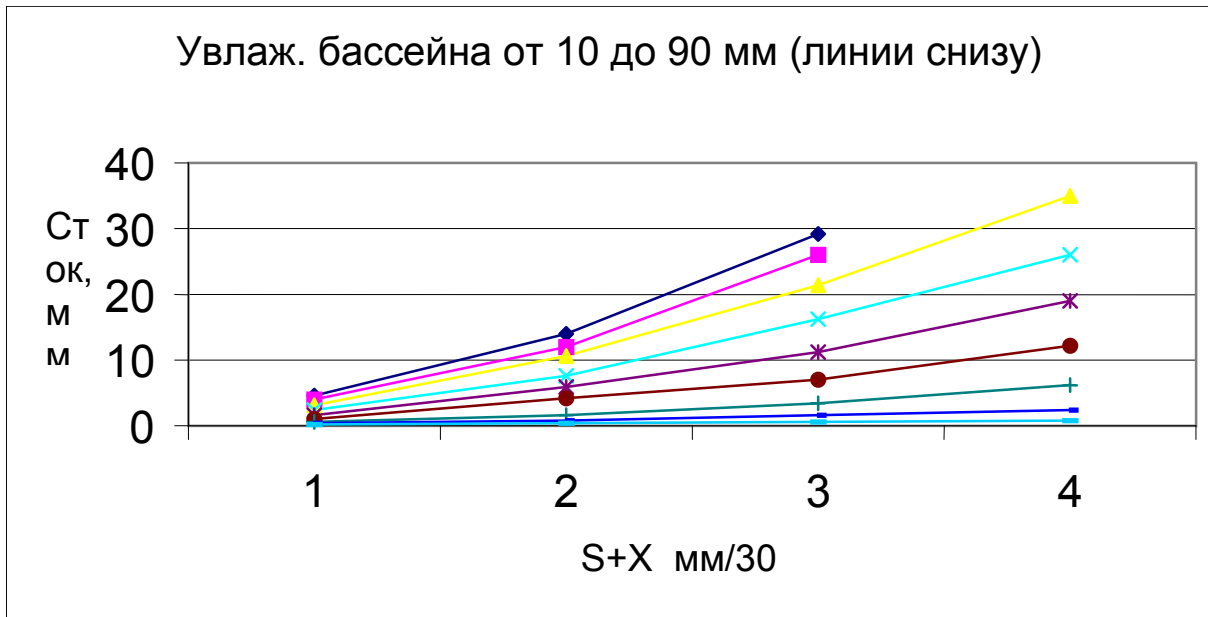


Рис.1. Зависимость слоя стока за половодье от запасов воды в снежном покрове. (S) и осадков (X), разделенных на 30, и увлажненности бассейна накануне половодья (W).

Точность этой зависимости удовлетворительная, в оперативных прогнозах величины осадков до конца половодья заменяются их нормой.

По фактическим данным построена связь между максимальными уровнями воды в период половодья и объемом стока за второй квартал (рис.2 и 3). Связь имеет высокую степень тесноты и поэтому принята для аппроксимации и дальнейшего использования в оперативной практике. Зависимость разбита на две части. Нижняя ее часть построена в укрупненном масштабе по оси Y на рис. 3.

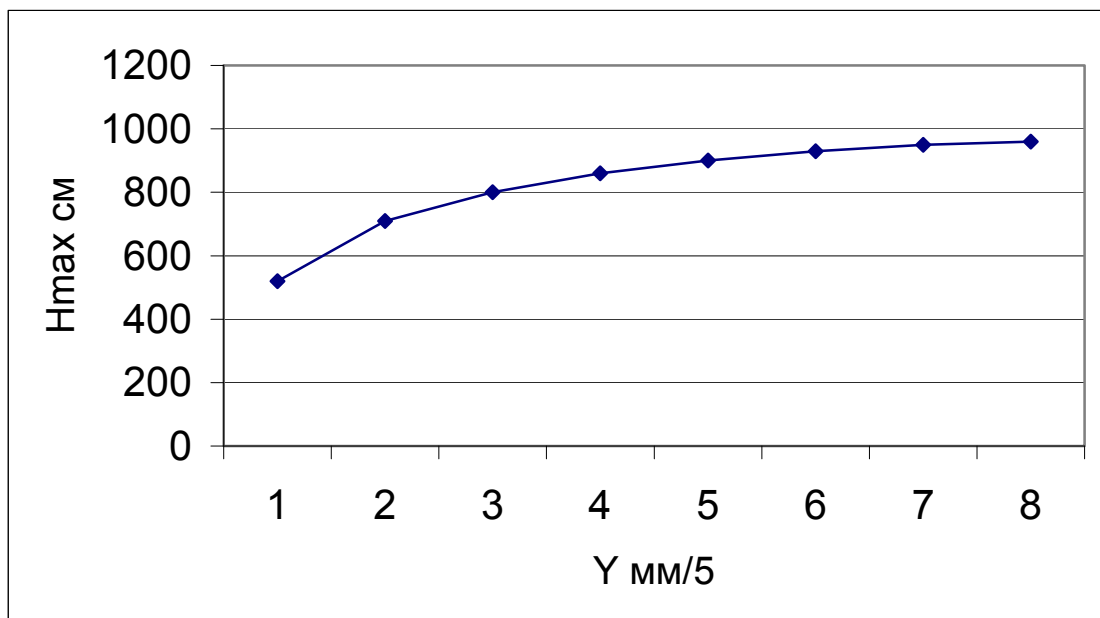


Рис.2. Зависимость максимальных уровней от слоя стока за второй квартал, деленного на 5.

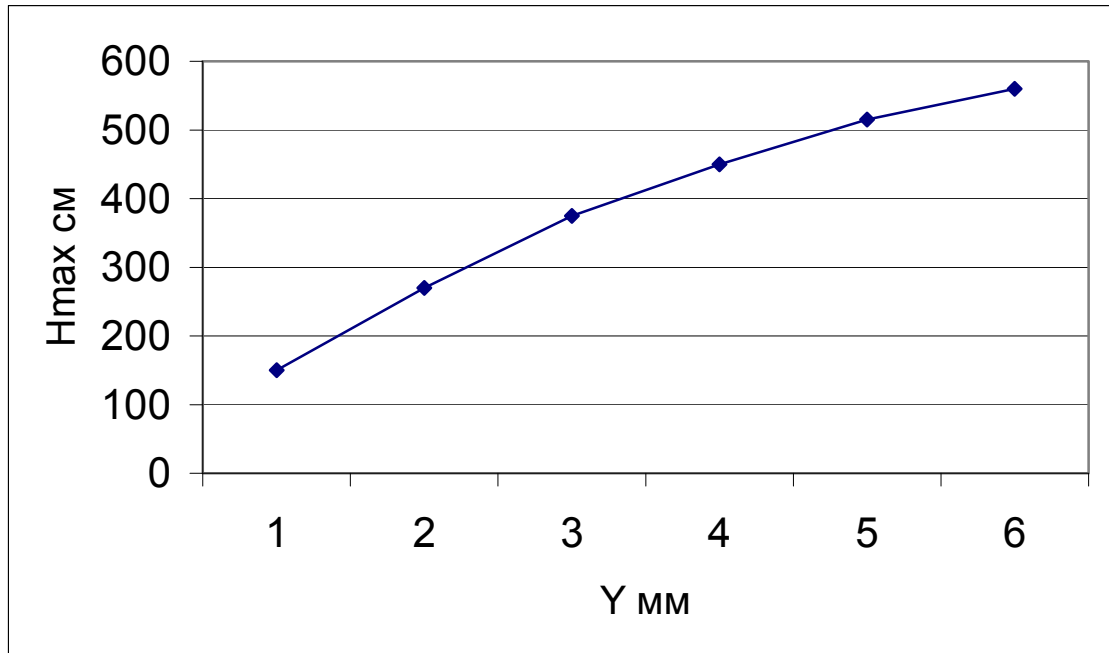


Рис.3. Нижняя часть зависимости максимальных уровней воды (H_{\max}) от слоя стока за второй квартал (Y) между $Y=0$ и $Y=5$ мм.

Аналитическое выражение кривой $H_{\max} = f(Y)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} H_{\max} &= -6,555Y^2 + 134,32Y + 72,25 && \text{при } Y \leq 10 \\ H_{\max} &= -0,406Y^2 + 26,192Y + 538,76 && \text{при } Y < 10 \end{aligned} \quad (2)$$

где H_{\max} - максимальные уровни, см;
 Y - слой стока, мм.

Авторская оценка точности прогнозов по приведенным уравнениям на выборке данных за 37 лет, в которые вошли наблюдения и в многоводный ($H_{\max} = 1087$ см) и маловодный годы ($H_{\max} = 171$ см), показала следующие результаты: оценка эффективности метода $S/\sigma = 0,52$, при допустимой ошибке прогноза в 173 см и норме $H_{\max} = 560$ см обеспеченность допустимой ошибки равна 81%.

Волна половодья, продвигаясь по руслу Тобола вниз, трансформируется и амплитуда ее максимума в многолетнем разрезе снижается, хотя ее объем пополняется за счет боковых притоков. Синхронность прохождения волны половодья по притокам и основному руслу может приводить к росту пика на основном русле. Однако установленные статистические связи между пиками, проходящими через створы п.Курган, п.Ялуторовск и п.Иевлево имеют высокие коэффициенты корреляции. Коэффициент корреляции связи между пиками в п.Курган и п.Ялуторовск равен 0.82, а между пиками в п.Курган и п.Иевлево – 0.68, между пиками в п. Ялуторовск и п. Иевлево – 0.84. Прогноз H_{\max} в п.Ялуторовск по данным прогноза H_{\max} в п.Курган имеет оценку эффективности S/σ , равную 0,70, а в п.Иевлево – 0,75. Оценки получены по 29-летнему ряду наблюдений, в который входят и многоводный и маловодный годы.

Формула для прогноза максимальных уровней в п.Ялуторовск по результатам прогноза в п.Курган имеет следующий линейный вид:

$$H_{\max}(\text{Ялуторовск}) = 0.569 H_{\max}(\text{Курган}) + 293,9 \quad (3)$$

Обеспеченность успешных прогнозов по этому уравнению равна 67%.

Формула для прогноза максимальных уровней в п. Иевлево по данным прогноза в п.Курган имеет следующий линейный вид

$$H_{\max}(\text{Иевлево}) = 0.5227 H(\text{Курган}) + 500.2 \quad (4)$$

Обеспеченность успешных прогнозов по этому уравнению равна 70% (по 30-летнему ряду).

Асинхронность прохождения пиков на притоках, впадающих в р. Тобол между п.Курган и п.Ялуторовск, ухудшает точность прогнозов в нижерасположенных створах.

Теснота взаимосвязи величины пиков на р.Туре в п.Тюмень, впадающей выше п.Иевлево, с величинами пиков в п.Иевлево, оценивается величиной коэффициента корреляции, равной 0,97, а $S/\sigma = 0,24$. Это значит, что хороший прогноз H_{\max} на р.Туре в п.Тюмень должен улучшить прогноз в п.Иевлево.

Уравнение для прогноза H_{\max} в п.Иевлево по данным прогноза в п.Курган и п.Тюмень на р.Туре имеет следующий вид:

$$H_{\max}(\text{Иевлево}) = 0.27 H_{\max}(\text{Курган}) + 1.03 H_{\max}(\text{Тюмень}) - 15,0 \quad (5)$$

Коэффициент корреляции аргументов и функции этого уравнения равен 0,97, а эффективность прогноза - $S/\sigma = 0.25$.

Оценка надежности метода произведена на независимой выборке данных, относящихся к 1997-2003 гг. Для долгосрочных прогнозов это довольно представительная выборка, в которую вошли разнообразные по водности годы. Результаты проверки приведены в расположенных ниже табл. 1-3. В этих таблицах используются следующие обозначения. Фактические максимальные уровни воды – Нф.; прогнозные уровни – Нп.; абсолютная величина ошибки прогноза - $|\delta|$; прогноз максимальных уровней, составленный по применяемой в оперативной практике методике – Нп.оф.; в скобках приводятся уточненные прогнозы, составленные позже основного срока, но также в оперативном режиме.

Таблица 1.

Оценка точности прогнозов максимальных уровней на р. Тобол в п. Курган, составленных по разработанной и по официальной (Нп.оф.) методикам на независимой выборке данных.

Год	Нф.	Нп.	$ \delta $	Нп.о ф.	$ \delta $
1997	195	239	44	360	165
1998	400	511	111	540	140
1999	416	408	8	480	64
2000	889	750	139	600 (1000)	289
2001	608	852	244	900 (620)	292
2002	907	884	23	800	107
2003	665	695	30	740	75
S/δ			0,66		> 1

Таблица 2.

. Оценка точности прогнозов максимальных уровней на р.Тобол в п. Ялуторовск, составленных по разработанной и по официальной методикам.

Год	Нф	Нп.	$ \delta $	Нп.оф.	$ \delta $
-----	----	-----	------------	--------	------------

1997	417	430	13	500	83
1998	651	588	63	570	81
1999	692	526	166	700	8
2000	809	720	89	650	159
				(800)	
2001	810	783	27	800	10
2002	775	782	7	740	35
2003	692	697	5	730	38
S/ σ			0,64		0,64
P%			86		86

Таблица 3.

Оценка точности прогнозов максимальных уровней на р.Тобол в п. Иевлево, составленных по разработанной и по официальной методикам.

Год	Нф	Нп.	$ \delta $	Нп.оф.	$ \delta $
1997	--	--	--	--	--
1998	--	--	--	--	--
1999	--	--	--	--	--
2000	--	--	--	--	--
2001	1053	950	103	800	253
2002	1064	963	101	900	164
2003	901	871	30	950	49
P%			100		33

Сравнение прогноза величины N_{max} с фактическими данными в п.Курган, п.Ялуторовск и п.Иевлево показало, что из 7 прогнозов оправдалось 6 для п. Курган и п. Ялуторовск. Эффективность метода, определенная по соотношению S/σ для этих створов по семи годам, не вошедшим в зависимую выборку, равна $\sim 0.64 - 0.66$.

Для п.Иевлево эффективность метода оказалось возможным проверить лишь по трем годам независимой выборки 2001-2003 гг. Все прогнозы оправдались, а $S/\sigma = 0.62$.

Сравнение с прогнозами, составленными официально, показало, что разработанный метод дает более точные результаты. В 7 рассматриваемых годах официальные прогнозы без уточнений в п.Курган давали результаты $S/\sigma > 0,8$. В п.Иевлево из трех прогнозов оправдался только один.

Весной 2004 г. составлены прогнозы в оперативном режиме. Результаты приводятся в табл. 4 и 5.

Таблица 4.

Прогнозы максимальных уровней воды, составленные в оперативном режиме по разработанной методике, за период половодья в п, Курган, в п. Ялуторовск и в п. Иевлево в 2004 г. и оценка их точности.

		п.КУРГАН			П. ЯЛУТОРОВСК			п.ИЕВЛЕВО		
W	S+x	Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $
37	76	514	510	4	563	584	11	758	767	9

Таблица 5

Прогнозы максимальных уровней воды, составленные по официальной методике, за период половодья в п. Курган, в п. Ялуторовск и п. Иевлево в 2004 г., и оценка их точности.

W	S=x	п.КУРГАН			п.ЯЛУТОРОВСК			п.ИЕВЛЕВО		
		Нф	Нп	\delta	Нф	Нп	\delta	Нф	Нп	\delta
37	76	514	360 (550)	254 (36)	254	563	113	758	620	138

Из содержания таблиц следует, что по разработанной методике прогнозы H_{\max} для всех трех пунктов оправдались, а по применяемой в настоящее время методике потребовалось позже основного срока составить уточнение для п.Курган.

Проведенные исследования по разработке метода долгосрочных прогнозов максимальных уровней р. Тобол позволили:

- определить основные факторы формирования весеннего стока и величины максимального уровня р. Тобол у п.Курган, п.Ялуторовск и п. Иевлево;
- аппроксимировать математическими выражениями связь между запасами воды в снежном покрове, сложенными с осадками за период половодья, увлажнением бассейна и объемом весеннего половодья в п.Курган;
- формализовать связь между объемом половодья и максимальным уровнем воды в п..Курган.
- получить способ прогноза максимальных расходов воды в пунктах ниже п.Курган – п.Ялуторовск и п.Иевлево;
- включить в метод прогноза максимального уровня воды в п.Иевлево за половодье данные о максимальном уровне в п.Тюмень на р.Туре, впадающей в р.Тобол выше п.Иевлево;

Проведенные проверочные авторские испытания метода прогноза максимальных уровней в п.Курган, в п.Ялуторовск и в п.Иевлево на зависимой и независимой выборках показали практически приемлемые результаты. Эффективность метода оценивается величиной $S/\sigma = 0,7$.

Оперативные испытания весной 2004г. показали, что точность прогнозов для всех трех пунктов на Тоболе оказалась выше по разработанному методу, чем по методу, применяемому в настоящее время. Для увеличения точности прогнозов необходимо разработать метод прогноза объема половодья и максимальных уровней воды в п.Тюмень на р.Туре и включить в технологическую схему прогнозов уровней на р.Тобол.

ТАБЛИЦЫ К СТАТЬЕ МУХИНА И ДР. “ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ ...”

Таблица 1.

Оценка точности прогнозов максимальных уровней на Тоболе в г. Курган, составленных по разработанной и по официальной (Нп.оф.) методикам на независимой выборке данных.

Год	Нф.	Нп.	$ \delta $	Нп.о ф.	$ \delta $
1997	195	239	44	360	165
1998	400	511	111	540	140
1999	416	408	8	480	64
2000	889	750	139	600	289
				(1000)	
2001	608	852	244	900	292
				(620)	
2002	907	884	23	800	107
2003	665	695	30	740	75
S/ δ			0,66		> 1

Таблица 2.

Оценка точности прогнозов максимальных уровней на р.Тобол в п. Ялуторовск, составленных по разработанной и по официальной методикам.

Год	Нф.	Нп.	$ \delta $	Нп.о ф.	$ \delta $
1997	417	430	13	500	83
1998	651	588	63	570	81
1999	692	526	166	700	8
2000	809	720	89	650	159
				(800)	
2001	810	783	27	800	10
2002	775	782	7	740	35
2003	692	697	5	730	38
S/ σ			0,64		0,64
P%			86		86

Таблица 3.

Оценка точности прогнозов максимальных уровней на р.Тобол в п. Иевлево, составленных по разработанной и по официальной методикам.

Год	Нф.	Нп.	$ \delta $	Нп.о ф.	$ \delta $
1997	--	--	--	--	--
1998	--	--	--	--	--
1999	--	--	--	--	--
2000	--	--	--	--	--
2001	1053	950	103	800	253
2002	1064	963	101	900	164
2003	901	871	30	950	49
P%			100		33

Таблица 4.

Прогнозы максимальных уровней воды за период половодья в г. Курган, в п. Ялуторовск, и в п. Иевлево в 2004 г., составленные в оперативном режиме по разработанной методике, и оценка их точности.

W	S+x	п. КУРГАН			п. ЯЛУТОРОВСК			п.ИЕВЛЕВО		
		Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $
37	76	514	510	4	563	584	11	758	767	9

Таблица 5.

Прогнозы максимальных уровней воды за период половодья на в г. Кургане , в п. Ялуторовске и в п. Иевлево в 2004 г., составленные по официальной методике, и оценка их точности.

W	S=x	п. КУРГАН			п.ЯЛУТОРОВСК			п. ИЕВЛЕВО		
		Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $	Нф	Нп	$ \delta $
37	76	514	360 (550)	254 (36)	254	563	113	758	620	138

РИСУНКИ К САТЬЕ МУХИНА И ДР . “ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ”

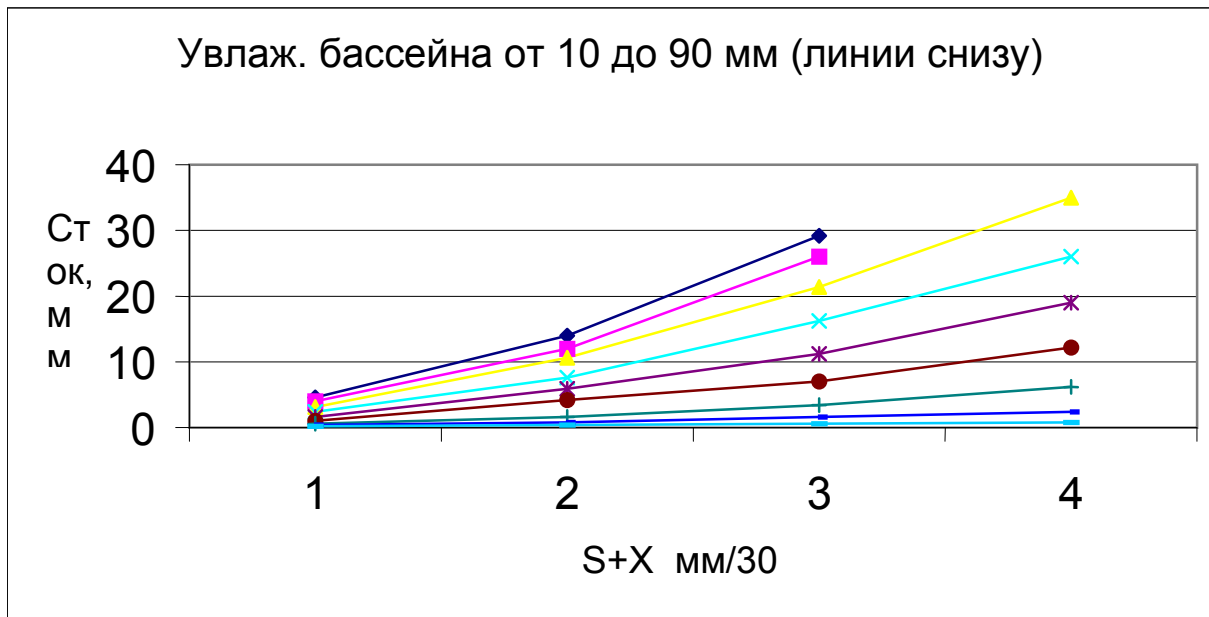


Рис.1. Зависимость слоя стока за половодье от запасов воды в снежном покрове (S) и осадков (X), разделенных на 30, и увлажненности бассейна накануне половодья (W).

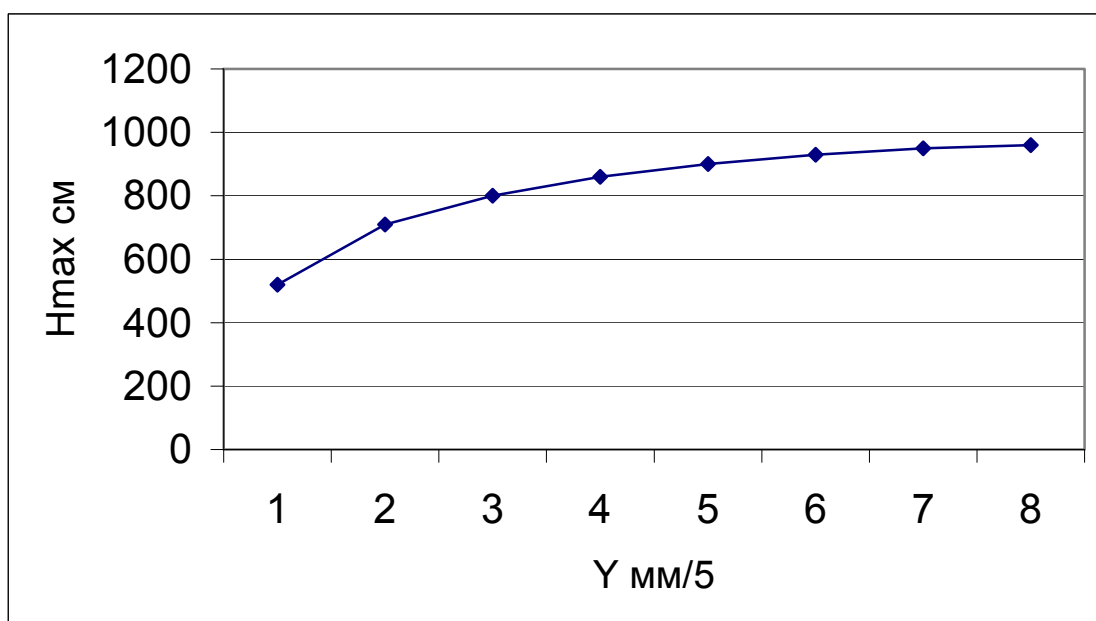


Рис.2. Зависимость максимальных уровней от слоя стока за второй квартал, деленного на 5.

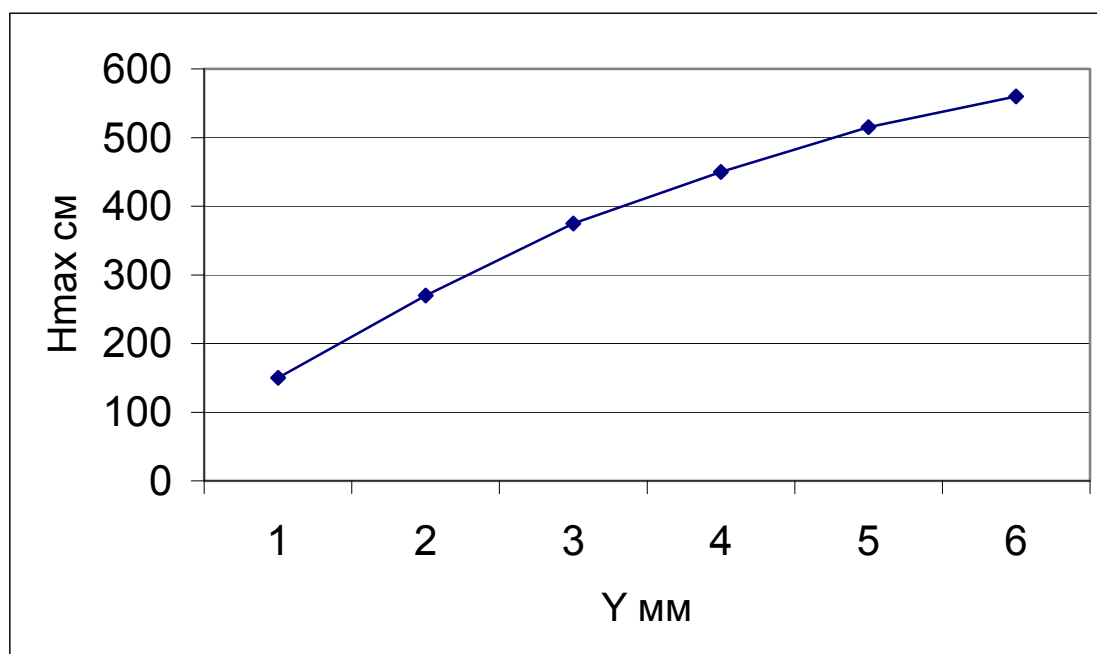


Рис.3. Нижняя часть зависимости максимальных уровней воды (H_{\max}) от слоя стока за второй квартал (Y) между $Y=0$ и $Y=5$ мм.