

Эмпирические методы прогноза быстроразвивающихся паводков на некоторых притоках р. Кубани

Крупнейшие юго-западные притоки р. Кубани (реки Псекупс, Пшиш и Белая) впадают в Краснодарское водохранилище, расположенное выше г. Краснодар. Река Пшеха является самым крупным притоком р. Белой, впадает в нее несколько выше Белореченского водохранилища. Представление о взаимном расположении речных систем дает рис. 1.

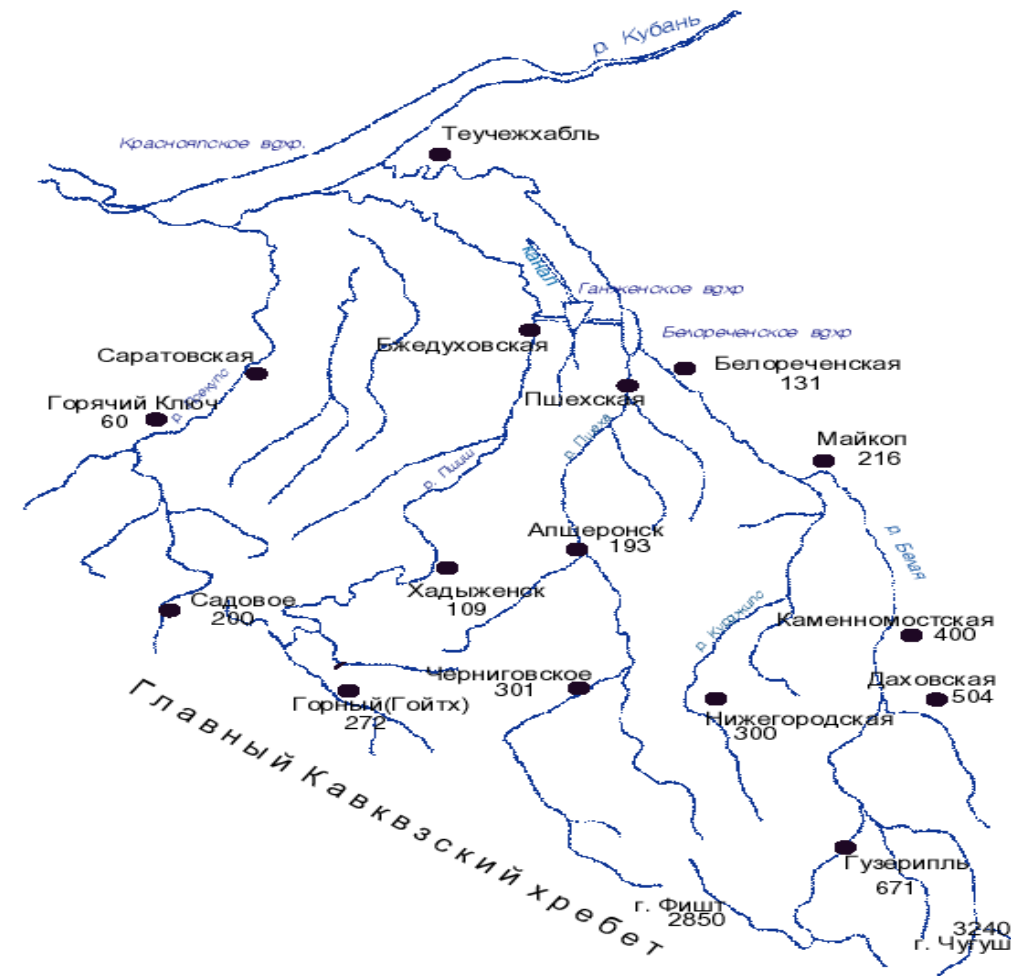


Рис.1. Схема юго-западных притоков р. Кубани (числа у пунктов соответствуют абсолютным отметкам).

Бассейны рек расположены на северном склоне северо-западного окончания Главного Кавказского хребта. На предгорную равнину приходится лишь нижнее течение этих рек. Невысокие на северо-западе горы повышаются к верховьям р. Белой на юго-востоке – снеговым вершинам Фишт и Чугуш высотой соответственно 2850 и 3240 мБС. В бассейне р.Белой имеются ледники площадью около 3 км². Представление о распределении площади бассейнов рек по высоте дает рис. 2, на котором даны гипсографические кривые юго-западных притоков Кубани.

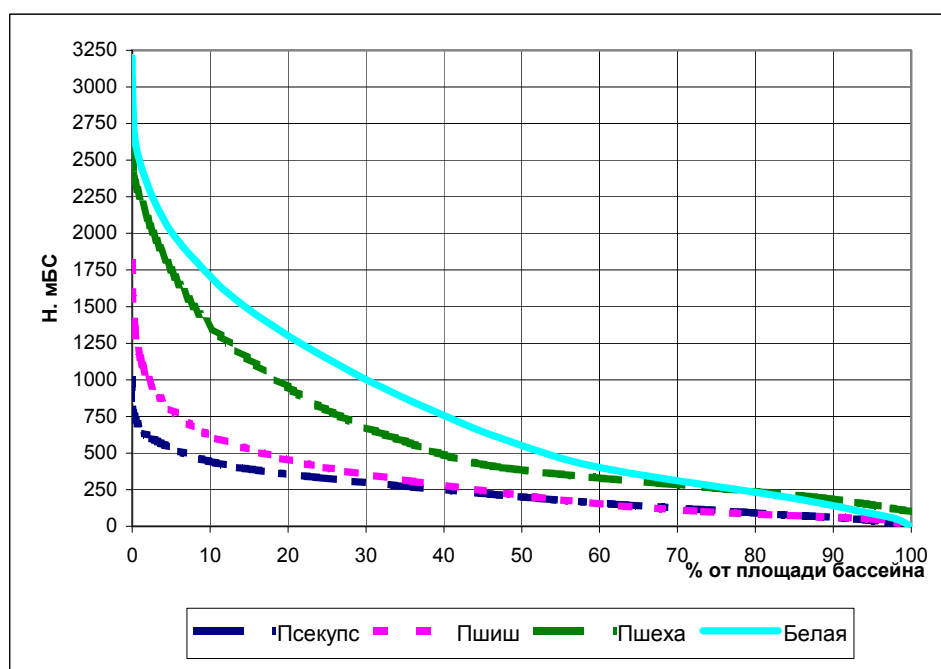


Рис.2. Гипсографические кривые юго-западных притоков р. Кубань.

Для горной части бассейнов характерно глубокое расчленение рельефа долинами рек. Река Белая прорезает в верхнем и среднем течении гранито-гнейсовые и известняковые толщи хребтов, в диапазоне высот 800-1000 м - куэсты, простирающиеся вдоль Главного Кавказского хребта, образуя при этом глубокую и узкую долину с крутыми склонами. При длине 229 км падение реки составляет 2283 м.

Сложная орография и расположение горных хребтов на пути основных влагонесущих потоков определяют неоднородность территории бассейнов в климатическом отношении. Здесь характерны теплые зимы со значительным числом оттепелей, часто сильными и продолжительными, с большим количеством осадков. Снежный покров, как правило, неоднократно устанавливается и сходит, даже в горах. Отметим, что в отдельные годы на всей площади бассейнов бывает довольно высокий снежный покров с запасом воды более 100 мм. Однако и он держится недолго [7].

В табл. 1 приведен каталог опасных уровней воды юго-западных притоков р.Кубани.

Таблица 1

Каталог опасных уровней воды юго-западных притоков Кубани

Название реки	Пункт (п.)	Наивысший уровень воды, см	Опасный уровень воды, см	Особо опасный уровень воды, см
Белая	Гузерибль	430	-	-
Белая	Каменноостская	830	675	700
Пшеха	Апшеронск	820	770	800
Пшиш	Гойтх	496	-	-
Пшиш	Хадыженск	897	700	-
Пшиш	Теучежхабль	983	900	935
Псекупс	Горячий Ключ	680	586	668
Фарс	Дондуковская	564	390	-

Для разработки метода гидрологического прогноза в метеорологические данные были включены суточные суммы осадков и среднесуточные величины температуры и влажности воздуха по 5 метеостанциям и 8 метеопостам; гидрологическая – суточные значения уровней

и расходов воды в 9 створах указанных рек. Расположение гидрометеорологических станций и постов, а также их абсолютная высота представлены на рис. 1. Период наблюдений составил 11 лет - с 1992 по 2002 г.

Кроме перечисленных данных для анализа температурного режима и режима выпадения осадков в бассейнах рек привлекались метеорологические данные, полученные на указанных станциях и постах за период 1961-1988 гг.

Сопоставление гипсографических кривых бассейнов рек (табл. 2, рис.2.) с данными об абсолютной высоте метеорологических станций и постов подтверждает существующую для среднестатистического горного речного бассейна закономерность: верхняя часть бассейна, где формируется значительная доля стока, не освещается метеорологическими наблюдениями. Так, в бассейне р. Псекупс наибольшую абсолютную отметку имеет метеостанция п.Садовая - 200 мБС, а 50.3% площади бассейна находится выше нее. Аналогичная картина наблюдается и в бассейнах 3 других рек: в бассейне р. Пшиш выше метеостанции п.Горная (272 мБС) расположено около 42% площади; в бассейне р. Пшеха выше п.Черниговская (301 мБС) – 67.6%; в бассейне р. Белой выше п.Гузерибль (671 мБС) – около 44% площади. Подчеркнем, что данный расчет (при линейной интерполяции) произведен до устьевых замыкающих створов. При рассмотрении частных бассейнов неосвещенная метеорологическими наблюдениями доля бассейнов очевидно увеличится.

Таблица 2

Координаты гипсографических кривых юго-западных притоков Кубани

№ горизонтального сечения	Высота горизонтального сечения	Площадь горизонтального сечения, в % от площади водосбора рек			
		р.Псекупс	р.Пшиш	р.Пшеха	р.Белая
1	3200				0
2	3000			0	0,02
3	2800			0,01	0,17
4	2600			0,04	0,46
5	2400			0,15	1,49
6	2200			1,35	3,01
7	2000			2,70	5,15
8	1800		0	4,53	8,37
9	1600		0,04	6,66	12,1
10	1400		0,27	9,46	17,2
11	1200		0,83	13,6	23,2
12	1000	0	2,11	18,6	30,1
13	800	0,04	5,04	24,8	38,2
14	600	2,53	11,0	33,9	47,4
15	400	13,8	24,9	47,6	60,1
16	200	50,3	51,7	87,6	84,0
17	100	77,2	73,4	100	93,7
18	50	93,0	95,4		98,1
19	32.75	100	100		100

Следует отметить неоднородность многолетнего ряда наблюдений на метеостанции п.Горная (бывшая Гойтх), которая была в 1972 году перенесена и переименована. Причем сведения об этом носят весьма противоречивый и неясный характер, что требует ряда уточнений.

Гидрологические данные наблюдений были подвергнуты первичному анализу путем построения графиков кривых расходов воды $Q=f(H)$. Наиболее сложный вид имеют кривые расходов в створе Горячий Ключ на реке Псекупс. На рис. 3 приведены кривые расходов воды в указанном створе за 1992, 1995 и 2002 гг. Хотя трудно выявить все причины значительного разброса точек на графике, однако можно предположить, что одной из главных является нарушение однородности в измеренных величинах расходов воды, которые, как обнаружилось, измеряются разнообразными приближенными способами. Полное выявление причин столь существенных изменений кривых расходов требует дополнительного исследования (не имеются в виду явные опечатки, отдельные примеры которых будут приведены ниже).

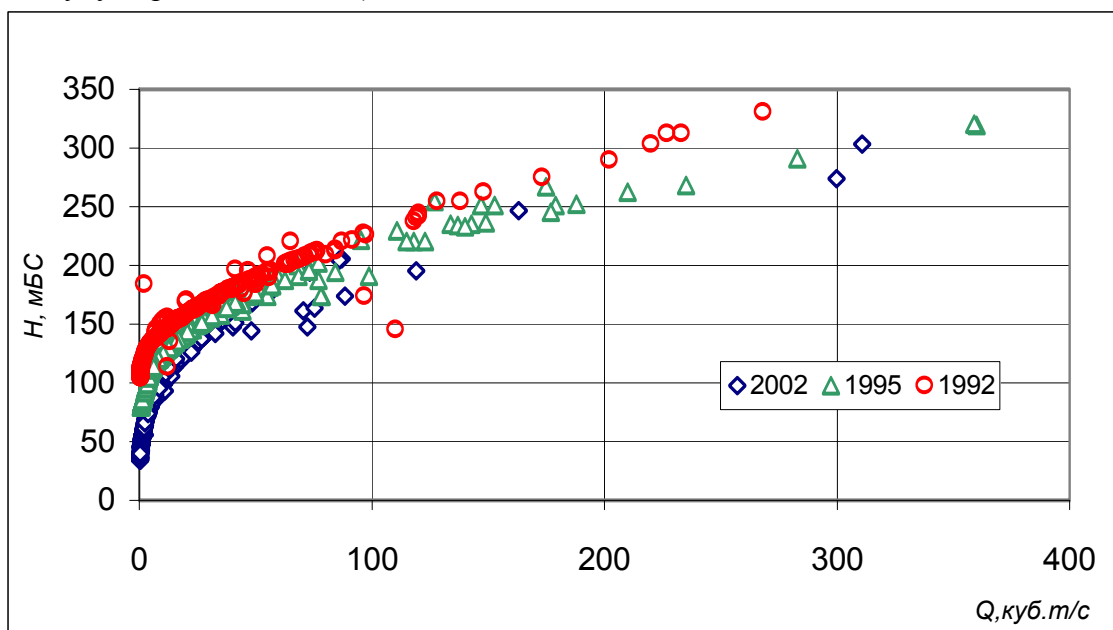


Рис.3. Графики кривых расходов воды на р. Псекупс в замыкающем створе Горячий Ключ.

Однако ясно, что в створе Горячий Ключ на р.Псекупс в 1992-2002 гг. сохранялась тенденция к понижению уровней воды при прохождении одного и того же расхода воды в разные годы (примерно 30 см за 10 лет). В основу анализа легли кривые $Q=f(H)$, построенные за каждый год (с 1950 по 1987 г.) по данным о среднесуточных и максимальных срочных уровнях и расходах воды, приведенным в ежегодниках и определенным по лентам самописцев уровня воды. Изменение кривой происходило вполне закономерно: расходы воды 50, 300 и 600 м³/с наблюдались в 1987 г., соответственно уровень воды на 2.7, 2.3 и 2.0 м ниже, чем в 1950 г., т.е. в среднем понижение составило 5-7 см/год. Причем на протяжении рассматриваемого многолетнего периода не прослеживается никакой тенденции систематического изменения стока и расходов воды р. Псекупс- п.Горячий Ключ.

Причиной, повлекшей за собой такого рода изменения кривых расходов воды $Q=f(H)$ в створе п.Горячий Ключ, является изменение гидравлики речного потока на участке водомерного поста. Данный факт можно связать со строительством ниже поста дамбы, которая вызвала определенное изменение направления течения реки и русловые деформации.

Однако остается открытым вопрос о причине столь долгого сохранения стабильности в изменении кривых расходов воды $Q=f(H)$. Из сказанного следует, что многолетний ряд уровней воды р. Псекупс в створе водомерного поста п.Горячий Ключ неоднороден и поэтому не может быть использован для разработки методики прогнозов паводков. Для этой цели больше пригодны многолетние ряды стока и расходов воды, которые можно считать однородными, хотя и не очень точными.

Аналогичная ситуация отмечается и для гидроствора в п. Апшеронск на р. Пшеха (рис. 3 и 4).

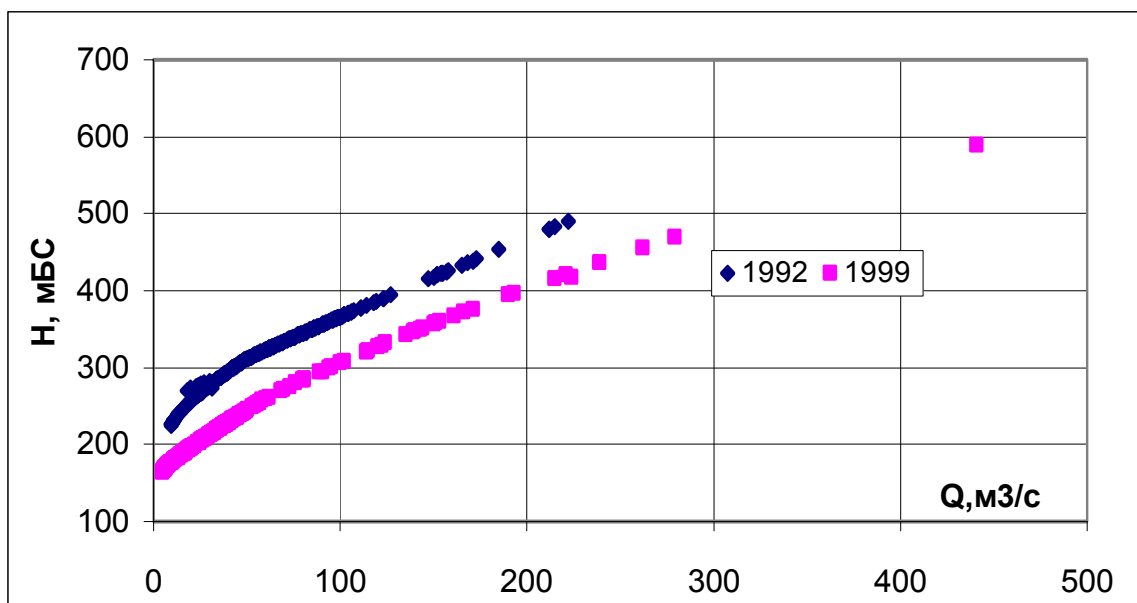


Рис.4. Графики кривых расходов воды р. Пшеха – п.Апшеронск за 1992 и 1999 гг.

К сожалению, в ходе выполнения работы не была выявлена причина изменения положения кривых расходов воды $Q=f(H)$ для створа в п. Апшеронск на р. Пшеха. Неустойчивость гидравлических показателей также имеет место и в русле р. Пшиш, что проявляется в изменении год от года вида кривых расходов воды $Q=f(H)$ в створе п.Хадыженск (рис.5). На этом рисунке видно, что в отличие от кривых для створов п.Горячий Ключ (р. Псекупс) и п.Апшеронск (р. Пшеха), изменение которых носит закономерный характер, кривые для р.Пшиш подвержены различным деформациям: они сходятся в верхней части и по-разному преломляются при средних значениях расходов. Столь неоднозначный вид кривых также требует дальнейшего исследования.

Наиболее устойчивые кривые расходов воды получены для р.Белой. Так, в гидрометрическом створе п.Каменноосткая за 11 лет изменения вида кривых расходов воды $Q=f(H)$ не произошло (рис.6.).

Анализ кривых расходов воды по четырем замыкающим створам рек Псекупс, Пшиш,

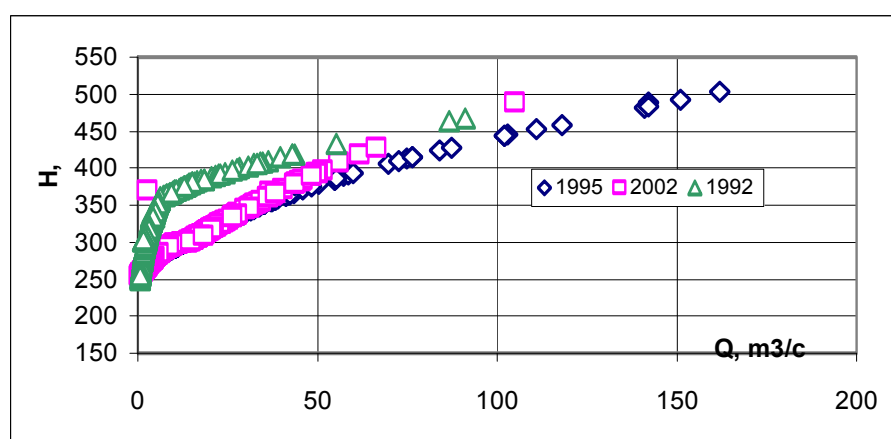


Рис.5. Графики кривых расходов воды р. Пшиш – Хадыженск.

Пшеха и Белая позволяет сделать вывод о том, что в основе разработки методик прогноза сильных и опасных паводков должны лежать многолетние данные о стоке и расходах воды в данных створах. Для получения прогнозных величин максимальных уровней воды можно использовать последнюю по времени зависимость $Q=f(H)$.

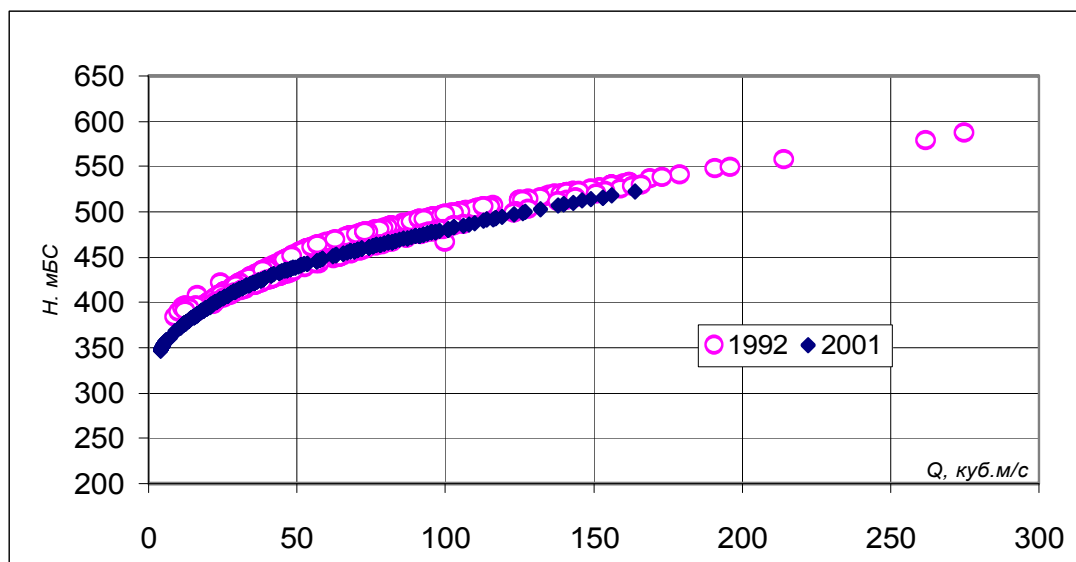
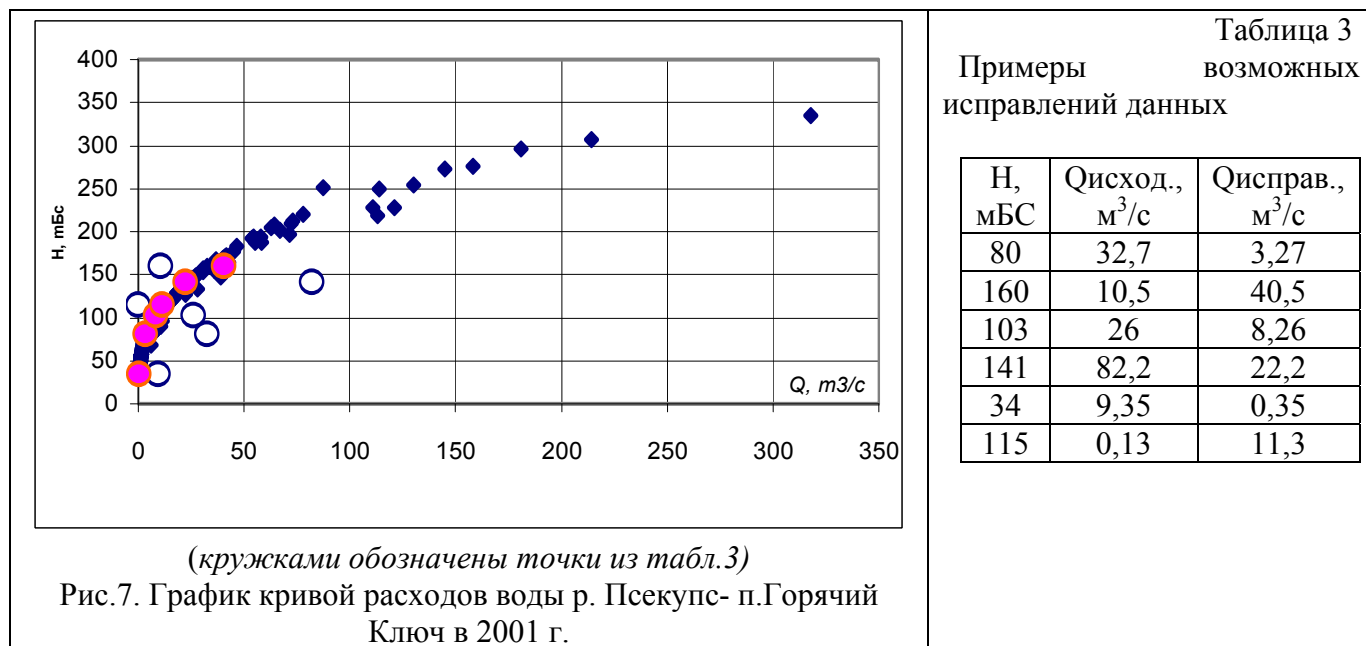


Рис.6. Графики кривых расходов воды р. Белая – п.Каменномостская.

Вся исходная информация требует тщательной проверки и анализа, т. к. ошибки могут достигать от 2- до 10- кратной величины, причем без всякой закономерности в их появлении. Редко они носят характер опечаток. Примеры приведены на рис. 7 и в соответствующей рисунку табл. 3.



(кружками обозначены точки из табл.3)

Рис.7. График кривой расходов воды р. Псекупс- п.Горячий Ключ в 2001 г.

Таблица 3
Примеры возможных исправлений данных

H, мБС	Qисход., м ³ /с	Qисправ., м ³ /с
80	32,7	3,27
160	10,5	40,5
103	26	8,26
141	82,2	22,2
34	9,35	0,35
115	0,13	11,3

К сожалению, не всегда ошибки столь очевидны, как в приведенном примере. Обнаружение и исправление грубых ошибок является весьма трудоемкой работой и к тому же не гарантирует общепринятой точности исходной информации, что факт в той или иной мере неизбежно сказывается на качестве разрабатываемых прогнозных методик.

В связи с климатическими особенностями зимнего периода для всех лет характерно прохождение паводков в большинстве зим. Доля весеннего половодья в годовом стоке зависит от географического положения бассейна и становится значительнее на юго-востоке, достигая наибольших величин в створах р. Белой. Наибольшие уровни весеннего периода чаще всего формируются при прохождении стока дождевого и талого происхождения. Летом наблюдается межень, нарушаемая ливневыми паводками. К осени значение дождевых

паводков в стоке рек значительно увеличивается, к концу осени они определяют водный режим данных рек.

Сильные и опасные паводки на юго-западных притоках р. Кубань могут формироваться в течение всего года, но по условиям формирования их можно подразделить на две группы: дождевые и тало-дождевые. В данной работе будут рассмотрены паводки первого типа (дождевые), формирующиеся при выпадении дождей в теплое время года - с 3 декады апреля по 3 декаду октября.

Для анализа условий формирования сильных и опасных паводков было рассмотрено более 400 паводков, прошедших на юго-западных притоках р. Кубани за 1992-2002 гг. Из них 17 наиболее значительных паводков прошли одновременно на всех притоках. Во всех четырех бассейнах при этом прошли сильные осадки.

Для указанных паводков были построены карты распределения осадков по площади бассейнов рек. Их анализ показал, что расположение ядра дождя (т.е. области выпадения наибольшего слоя стокоформирующих осадков) отражается на режиме прохождения паводка и его максимальных расходах. Кроме этого, реакция бассейнов на поступление примерно одного и того же слоя осадков неоднозначна. Определяющим в данном случае является увлажненность бассейна, которая и определяет коэффициент стока. Причем в большей степени на коэффициент стока влияет увлажнение бассейна в период таяния снега.

Из всего сказанного можно сделать следующие заключения:

- сильные и опасные паводки в створе одного из притоков формируются при прохождении значительных паводков на всех притоках, т.е. условия их формирования связаны с синоптической ситуацией на значительной территории;
- максимальные уровни паводков зависят от расположения ядра ареала дождя, вызвавшего паводок, слоя и интенсивности дождя;
- высота паводка и его объем в основном определяются условиями увлажнения бассейнов перед выпадением дождя.

Анализ условий формирования сильных и опасных паводков привел к необходимости выработки расчетных схем распределения основных метеорологических элементов – температуры воздуха и слоя осадков по площади бассейнов. Одним из основных методических приемов, хорошо зарекомендовавшим себя в прогностической практике, является построение зависимостей данных элементов от высоты местности.

Такого рода зависимости носят закономерный, устойчивый характер только для средних за многолетний период величин, полученных путем осреднения не менее чем за декаду. Обычно выбирается месячный интервал.

Для исследования температурного режима в пределах бассейнов юго-западных притоков р. Кубани были привлечены следующие многолетние месячные данные о температуре воздуха:

- за 1961-1988 гг. - по станциям п.Горячий Ключ (60 мБС), п.Даховская (504 мБС), п.Белореченск (131 мБС), п.Майкоп (216 мБС), п.Гузерибль (671 мБС);
- за 1992-2002 гг. - вместо данных по станции п.Гузерибль использованы данные по станции п.Горная (бывшая Гойтх) (272 мБС).

В первом случае наибольшая высота станции составила 671 мБС, во втором – 504. По данным указанных станций были получены зависимости температуры воздуха от высоты местности $\theta = f(z)$ для каждого месяца года.

Наибольший разброс точек отмечается в обоих случаях для зимних месяцев, особенно для февраля, что связано с неустойчивостью синоптической ситуации в этот период, а также с местными особенностями. Так, в данном районе обычны фены: температура воздуха среди зимы в феновом потоке повышается до 15-20 и более градусов тепла, что сопровождается бурным снеготаянием, приводящим к паводку [2].

Малый диапазон высот метеостанций и их расположение в низинных частях бассейнов, привели к значительному разбросу точек на графиках. Поэтому для уточнения зависимостей были дополнительно привлечены данные о средних многолетних месячных значениях температуры воздуха, рассчитанных за 1951-1978 гг. по 12 метеостанциям бассейна р.

Кубань. Среди использованных станций только три (п.Майкоп, п.Гойтх - Горная) и п.Гузерибль) расположены в пределах бассейнов юго-западных притоков. Остальные станции занимают диапазон высот от 158 до 2583 мБС. Полученные зависимости представлены на рисунке 8-9.

Графики связи $\theta = f(z)$ для всего бассейна Кубань характеризуются приемлемой теснотой связи: коэффициент корреляции находится в пределах 0.87 (для января) - 0.99 (для июня). Расположение на графиках точек, соответствующих станциям, находящимся в бассейнах юго-западных притоков, дает основание для вывода о том, что для расчета температурного режима рек Псекупс, Пшиш, Пшеха и Белая можно использовать зависимости, полученные для всего бассейна р. Кубани.

В нашей стране принят следующий вид зависимости $\theta = f(z)$ [1,3,4]:

$$\theta(z, t) = \theta(z_0, t) - \gamma(t)(z - z_0), \quad (1)$$

где $\gamma(t)$ - градиент вертикального изменения температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}/\text{км}$; t - переменная времени; $\theta(z_0, t)$ - средняя по станциям температура воздуха на высоте приведения Z_0 , вычисленная по выражению

$$\bar{\theta}(z_0, t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [\theta(z_j, t) - \gamma(t)(z_0 - z_j)], \quad (2)$$

где Z_j - высота j -ой станции, км; n - число станций.

Градиент $\gamma(t)$ обычно находят как тангенс угла наклона линии связи $\theta = f(z)$ по зависимостям от высоты среднегодовыи месячных значений приземной температуры воздуха.

Вертикальные градиенты температуры воздуха, как видно из приведенных на рис. 8 - 9 графиков, имеют закономерный внутригодовой ход. В виде соответствующего графика он представлен на рис. 10 (значения вертикального градиента даны в градусах на километр подъема в абсолютном выражении).

Наиболее хаотично изменяются значения вертикального градиента, полученного по многолетнему ряду 1961-1988 гг. Значения вертикального градиента для всего бассейна Кубани изменяются наиболее плавно и находятся в течение года (за исключением февраля и марта) в диапазоне значений, рассчитанных для бассейнов юго-западных притоков. Данное обстоятельство свидетельствует о возможности применения указанных зависимостей для расчета температурного режима в бассейнах юго-западных притоков.

Закономерный ход вертикального градиента температуры воздуха в горах (в частности, в горах всего бассейна р.Кубань) можно аппроксимировать довольно простым выражением [4]:

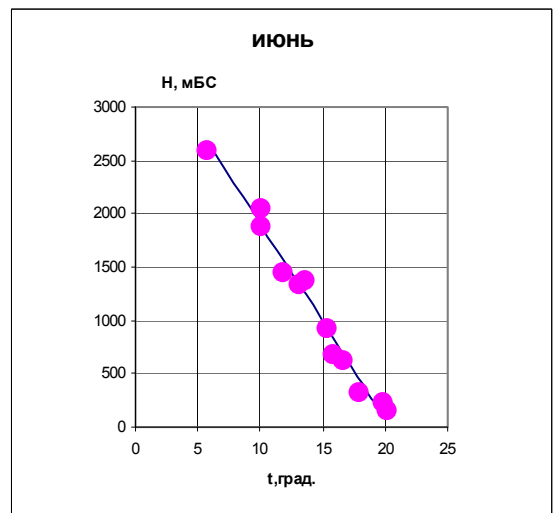
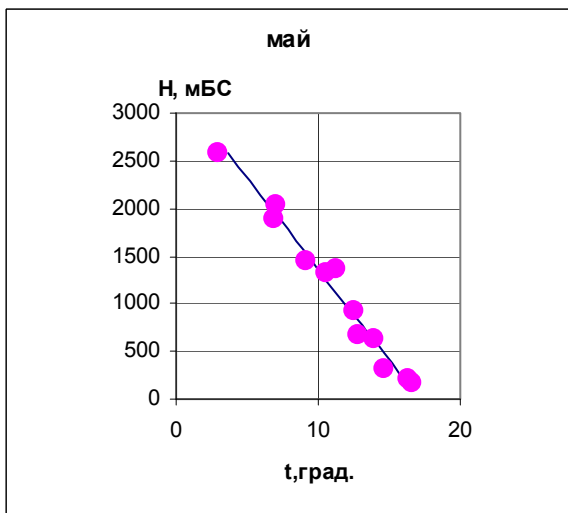
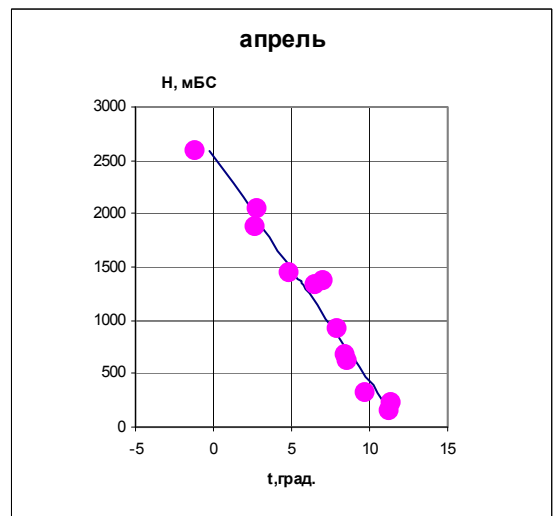
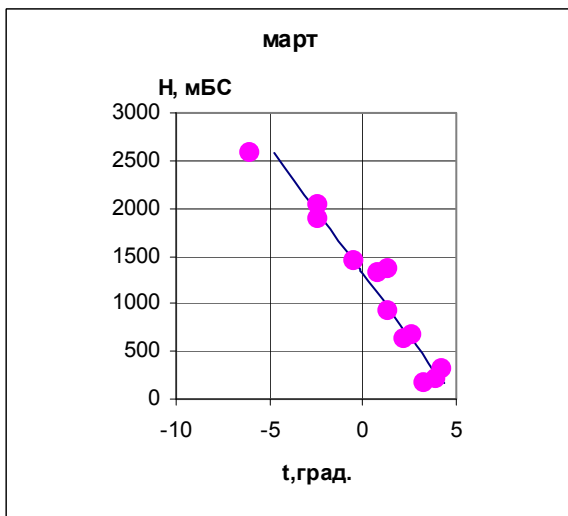
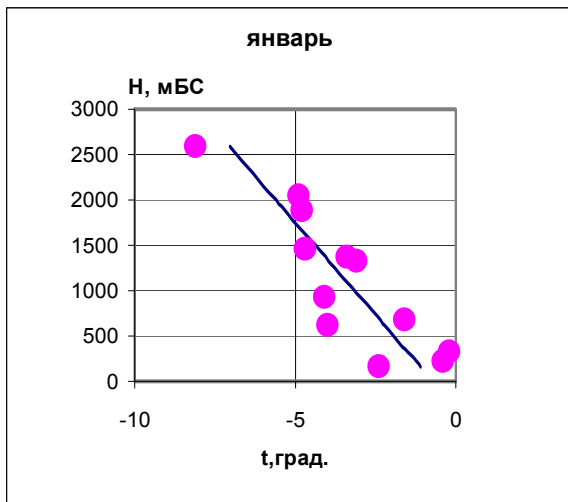


Рис.8. Зависимости средней многолетней месячной температуры воздуха для января-июня от высоты местности $\theta = f(z)$, полученной за период 1957-1978 гг. по 12 станциям бассейна р. Кубань.

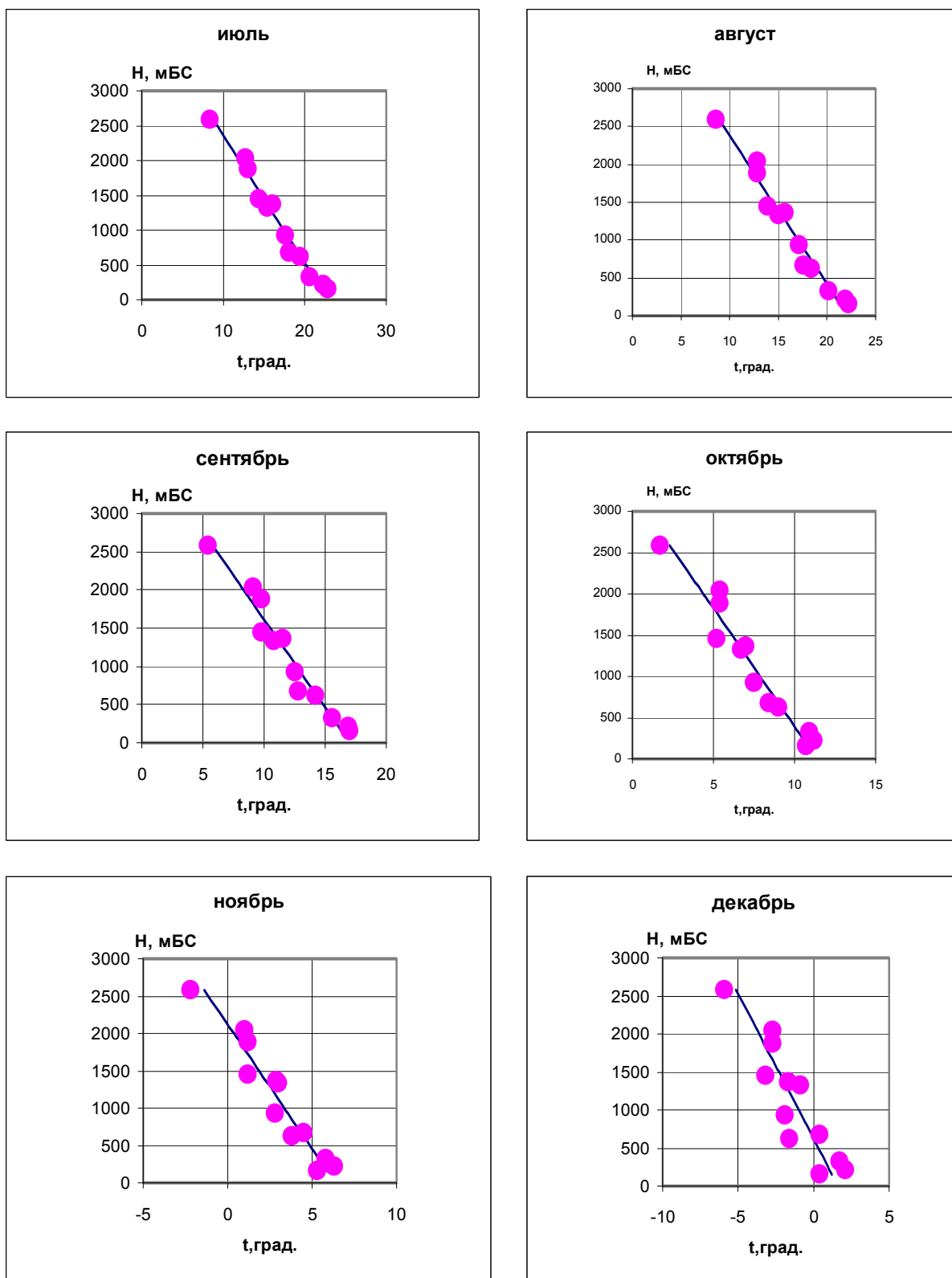


Рис.9. Зависимости средней многолетней месячной температуры воздуха для июля-декабря от высоты местности $\theta = f(z)$, полученной за период 1957-1978 гг. по 12 станциям бассейна р. Кубань.

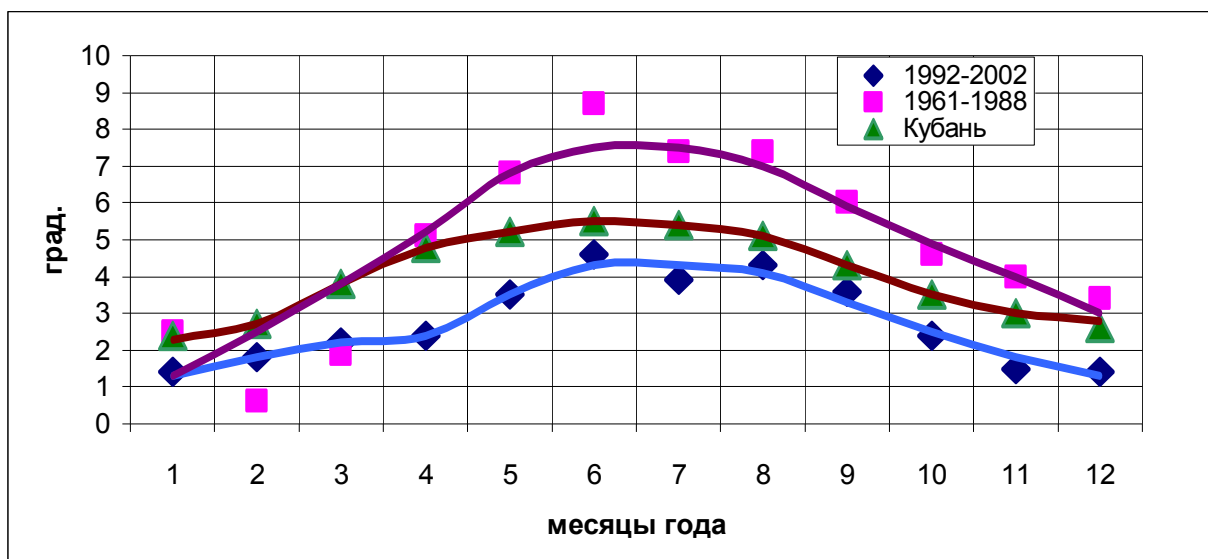


Рис.10. Внутригодовой ход значений вертикального градиента температуры воздуха.

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \frac{a^3 c}{a^2 c + (t - \tau)} \quad (3)$$

где γ_0 - расстояние от оси абсцисс до подошвы кривой $\gamma(t) = f(t)$; τ - расстояние по оси абсцисс от пика функции $\gamma(t) = f(t)$ до оси координат; a – расстояние по оси координат от подошвы функции $\gamma(t) = f(t)$ до максимального ее значения. Для функции, изображенной на рис. 10, параметры уравнения (3) соответственно равны: $a = 3$; $\tau = 182$; $\gamma_0 = 2,2$; $c = 490$.

Основным источником питания горной реки являются, как известно, осадки, выпавшие на поверхность водосбора реки в жидком или твердом виде. Их сезонное перераспределение в снежном и ледниковом покровах бассейна, а также потери на задержание растительностью или в понижениях, испарение и другие процессы стокоформирования могут быть адекватно оценены только на основе достоверно определенной закономерности распределения количества выпавших осадков по площади и высоте бассейна. Эта закономерность зависит от многих факторов, которые можно объединить в две группы. Первая группа факторов зависит от географического положения горной системы, ее водоразделов и пунктов наблюдения за осадками, их орографии и топографии. Вторая группа факторов определяется преобладающим типом циклонической деятельности, которая формирует либо конвективные и внутримассовые ситуации либо условия для адвекции, определяющие вынужденный подъем воздуха над горной преградой и уровень конденсации. В данной работе невозможно выделить специфический вклад того или иного фактора из перечисленных групп. Поэтому в качестве интегрального показателя, отражающего всю сложность осадкообразования в горных районах, может быть использована высота над уровнем моря.

Для каждой горной страны в зависимости от климатического пояса, в котором она расположена, характерно соответствующее распределение осадков по вертикальному профилю. Многочисленные исследования, посвященные изучению распределения осадков по высоте, свидетельствуют об увеличении количества осадков с высотой местности до определенного высотного уровня, который может находиться либо в пределах речного бассейна, либо выше его верхней границы [3].

Для бассейнов юго-западных притоков р. Кубани, в пределах которых наивысший пункт наблюдения за осадками расположен ниже 700 мБс, трудно определить степень увеличения количества выпадающих осадков с высотой. Однако многочисленные исследования по данной тематике позволяют говорить о тенденции увеличения количества осадков с высотой местности.

Одно из выражений, аппроксимирующих распределение осадков по высоте, описано в работах [1, 3] и применяется в работах [3,4,5]:

$$\underline{X(z, t) = X(z_0, t) \left[1 + k_2 (z - z_0) + k_3 (z - z_0)^2 \right]}, \quad (4)$$

где $X(z, t)$ и $X(z_0, t)$ - количество осадков на высоте z и z_0 в момент t ; k_2 и k_3 - параметры кривой зависимости $X=f(z)$, однозначно определяющие наклон и степень кривизны связи; z_0 - задаваемая высота, на которой величина осадков известна из наблюдений на станциях и постах. Обычно z_0 именуют как высоту приведения и назначают примерно равной средней взвешенной высоте водосбора.

Способ определения параметров k_2 и k_3 , разработан сотрудниками Гидрометцентра [3, 4] и основан на рекомендациях, содержащихся в работе [1]. Параметры определяются с помощью метода наименьших квадратов (МНК). В качестве аргументов выступают значения среднемноголетних месячных сумм осадков, соответствующие серединам высотных зон бассейна на графиках параболической зависимости $X=f(z)$. Использование среднемноголетних месячных величин позволяет выявить закономерность внутригодового изменения количества выпадающих осадков с высотой местности.

Параметры k_2 и k_3 уравнения (4) находят с помощью метода наименьших квадратов по координатам кривых, снятых с аппроксимаций зависимостей $X=f(Z)$, выполненных вручную.

По средним многолетним значениям месячных сумм осадков, измеренным на метеостанциях, расположенных в бассейнах, были получены отдельные зависимости для каждого бассейна юго-западных притоков. В качестве примера приведен график $X=f(z)$ для средних многолетних значений годовых сумм (рис.11).

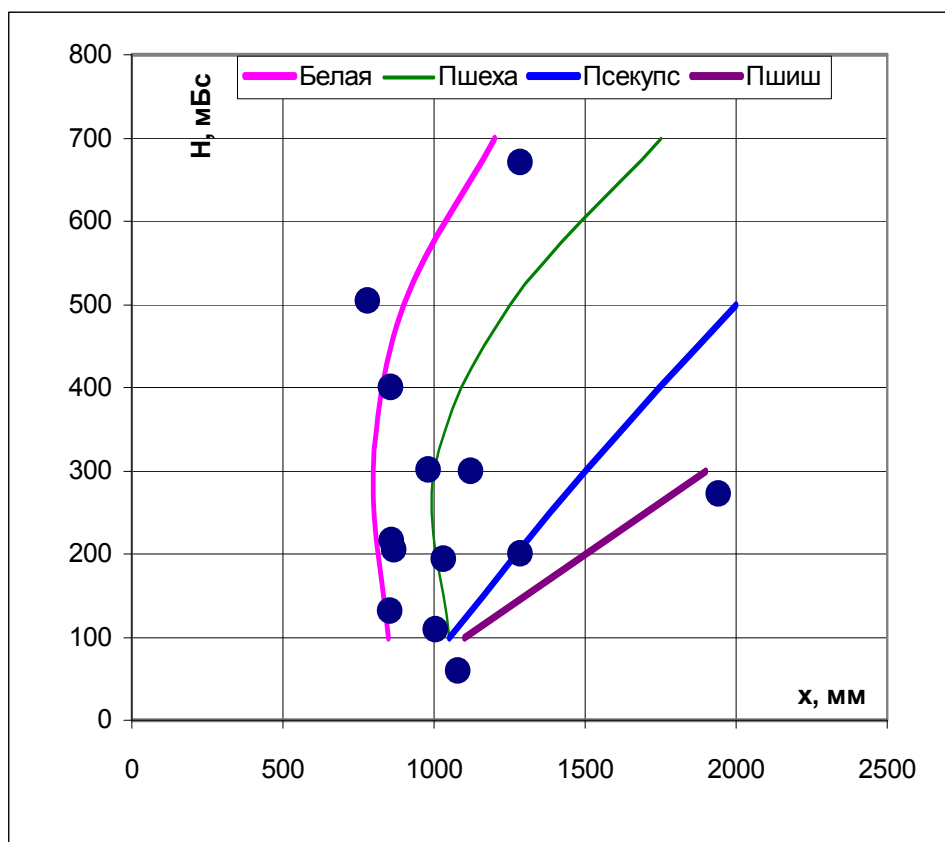


Рис.11. Зависимости средних многолетних значений годовых сумм осадков от высоты местности $X=f(z)$ для отдельных бассейнов юго-западных притоков р. Кубани.

В итоге аппроксимации были получены соответствующие значения коэффициентов k_2 и k_3 по отдельным бассейнам, представленные в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Значения коэффициента квадратической аппроксимации k_2

Название реки	Месяцы года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Белая	2,2	1,7	1,5	1,2	0,8	0,6	0,6	0,8	1,0	1,6	2,5	3,5
Пшеха	3,7	3,0	2,0	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,7	2,1	3,0	3,5
Пшиш	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	1,1	1,5	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8
Псекупс	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8		0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
Общая	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2

Таблица 5

Значения коэффициента квадратической аппроксимации k_3

Название реки	Месяцы года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Белая	5,0	3,8	2,5	1,5	0,2	-2	-2	0,0	1,5	3,5	5,0	6,2
Пшеха	7,5	5,5	3,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,7	3,0	4,5	7,0	9,0
Пшиш	-4	-4	-4	-3	-1	0,1	0,1	0,1	0,0	-2	-2	-4
Псекупс	0,5	0,2	0,0	0,1	0,0	-1	-1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4
Общая	3,0	2,0	1,5	0,5	0,0	-5	-5	-3	0,5	1,1	2,0	3,0

Данные табл.4 и 5 показывают заметные сезонные изменения параметров. Аналогичное явление зафиксировано во всех горных бассейнах, в которых были проведены подобные расчеты [1, 4 - 7].

В работе [1] предложена аппроксимация годового хода параметров k_2 и k_3 посредством выражения

$$k_2 = k_{2,0} + A_2 \cos \frac{2\pi}{T} (t - \tau_2), \quad k_3 = k_{3,0} + A_3 \cos \frac{2\pi}{T} (t - \tau_3), \quad (5)$$

где t - координата времени; T - число дней в году; $k_{2,0}$, $k_{3,0}$, A_2 , A_3 , τ_2 , τ_3 - параметры аппроксимации.

По данным табл. 4 и 5 была произведена аппроксимация годового хода k_2 и k_3 . Она позволяет рассчитывать суммы осадков по высоте бассейнов за любой заданный интервал времени. Однако надо отметить, что отдельные паводкообразующие дожди имеют распределение, отличное от среднего многолетнего, а особенности распределения слоя осадков по площади речного бассейна отражаются на прохождении паводка, в том числе, на формировании максимального стока за паводок.

Одним из перспективных направлений развития методов прогноза стока за паводок является использование численных методов прогноза поля сильных осадков с выделенным "ядром" дождя, положение которого и определяет особенности прохождения паводка. Определяющую роль в формировании летних дождевых паводков играют неравномерность выпадения осадков на водосбор, а также особенности стекания воды в горных районах. Это приводит к тому, что основным методом прогнозов паводков остаются эмпирические методы. Они позволяют в некоторой степени преодолеть указанные трудности за счет привлечения данных наблюдений за многолетний ряд и получения эмпирических зависимостей характеристик паводка от характеристик слоя осадков, формирующих паводок.

Одной из характеристик паводка является приращение стока, рассчитываемое как разность между расходом воды накануне паводка и максимальным его значением.

Пик суточных расходов быстро развивающихся паводков на сравнительно небольших юго-западных притоках р.Кубани, как правило, наблюдается на следующие сутки после начала выпадения сильного дождя. Такие случаи хорошо описываются экспоненциальной аппроксимацией истощения бассейновых запасов воды (включая, русловые) и поступлением талой и дождевой воды в основное русло притока.

Аналитическое описание этого процесса выглядит следующим образом [5]:

$$Q_{t+\Delta} - Q_{\bar{0}} = (Q_t - Q_{\bar{0}}) \exp(-\Delta t) + \alpha_1 q_t + \alpha_2 q_{t+\Delta}, \quad (6)$$

где - $Q_{t+\Delta}$ - прогнозируемый суточный расход воды, м³/с; Q_t - суточный расход воды в момент составления прогноза; $Q_{\bar{0}}$ - средний расход воды, характеризующий базисный сток; q_t и $q_{t+\Delta}$ - поступления талой и дождевой воды к притокам в момент составления прогноза t и момент осуществления прогноза $t + \Delta$; Δ - период заблаговременности прогноза, сут.; a , α_1 и α_2 - параметры.

После простых преобразований и ряда допущений последнее уравнение можно представить иначе:

$$Q_{t+\Delta} = aQ_t + \alpha(q_t + q_{t+\Delta}) + (Q_{\bar{0}} + a_1Q_{\bar{0}}). \quad (7)$$

Заменим q осадками X , $(Q_{\bar{0}} - a_1Q_{\bar{0}})$ - постоянной величиной C , а в левой части уравнения (7) подставим $Q_{t+\Delta} - aQ_t \approx Q_{t+\Delta} - Q_t = \Delta Q_{t+\Delta}$, тогда получим простые варианты уравнения (6):

$$\Delta Q_{t+\Delta} = \alpha(X_t + X_{t+\Delta}) + C, \quad (8)$$

или

$$\Delta Q_{t+\Delta} = \alpha(X_t) + C. \quad (9)$$

Далее для получения прогностических уравнений применялись две последние разновидности уравнений (8)- (9).

В данной работе в качестве показателя слоя осадков учитывались осадки, полученные с учетом их зависимостей от высоты местности.

Прогностические зависимости для юго-западных притоков реки Кубани были получены для створов, указанных в табл. 6. В ней приведены основные гидрологические сведения о створах.

Таблица 6

Основные гидрологические сведения о створах юго-западных притоков р. Кубани

Название водного объекта	Местоположение (название) створа	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, кв.км.	Средняя высота водосбора, мБС	Уровень НЯ, см	Уровень ОЯ, см
р. Белая	п Каменноостская	180	1850	343	650	680
р. Пшеха	п. Апшеронск	48	1480	181	730	760
р.Пшиш	п. Хадыженск	183	710	100	700	800
р.. Псекупс	п. Горячий Ключ	81	765	58	400	430

Кривые расходов, позволяют определить величину расхода воды, проходящего в створах при указанных в табл. 6 уровнях неблагоприятных и опасных явлений (НЯ и ОЯ).

Известно, что срочные значения расхода воды могут в 1,5-2 раза превышать их суточные максимальные величины, особенно на горных реках. Так, для р. Псекупс –п.Горячий Ключ значение расхода воды, при котором паводок будет опасным (т.е. уровень воды в реке станет равным или превысит уровень ОЯ), принят расход воды равный $280 \text{ м}^3/\text{с}$ (суточный расход) вместо $500 \text{ м}^3/\text{с}$ (срочный), соответствующих уровню ОЯ на кривой расходов. Вероятность того, что максимальный срочный расход воды за время паводка будет больше или равен $500 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднесуточном расходе больше или равном $280 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет 84%. Это, указывает на то, что при максимальном среднесуточном расходе воды в створе п.Горячий Ключ на р. Псекупс, большем или равном $280 \text{ м}^3/\text{с}$, дождевой паводок будет опасным. При среднесуточном расходе от 200 до $280 \text{ м}^3/\text{с}$ вероятность превышения уровня ОЯ в створе составляет около 10 %.

Отсутствие данных о срочных максимальных уровнях за период 1992-2002 гг. не позволяет получить зависимость значений срочных расходов от величины среднесуточных. Вопрос о соотношении максимальных уровней за паводок и соответствующих им расходах воды в гидрологических створах требует дальнейшего исследования, т.к. без его учета данные о значительном числе паводков, уровни которых превысили опасные отметки, не участвуют в выборке, по которой разрабатываются эмпирические зависимости. Данный факт определенным образом сказывается на качестве получаемых прогностических методик.

Так, анализ годового хода среднесуточных уровней воды в створах, указанных в табл. 6, показал, что за период 1992-2002 гг. опасных паводков в мае-октябре здесь не наблюдалось. Исключение составила р. Белая, где в июне 2002 г. прошел паводок, максимальный уровень которого превысил отметки ОЯ. Поэтому прогностические зависимости получены по данным о 17 высоких паводках, сформированных охватившими весь район сильными дождями. Экстраполяция зависимостей до отметок ОЯ и выше возможна по данным об опасных паводках.

Полученные эмпирические зависимости приводятся ниже в нескольких вариантах их осуществления. Наибольшую площадь и среднюю высоту водосбора имеет р.Белая до п.Каменноостская. В пределах водосбора расположено 3 метеостанции: п.Каменноостская, п.Даховская и п.Гузерибль. Сток достигает максимальных величин в первый день паводка, в который проходит около 45% его объема, сформированного суточным дождем. В одном из вариантов показатель слоя осадков X мм (рис.12), участвующих в формировании паводка, рассчитывался как сумма осадков за двое суток – за сутки накануне начала паводка и первые сутки паводка, на которые составляется прогноз.

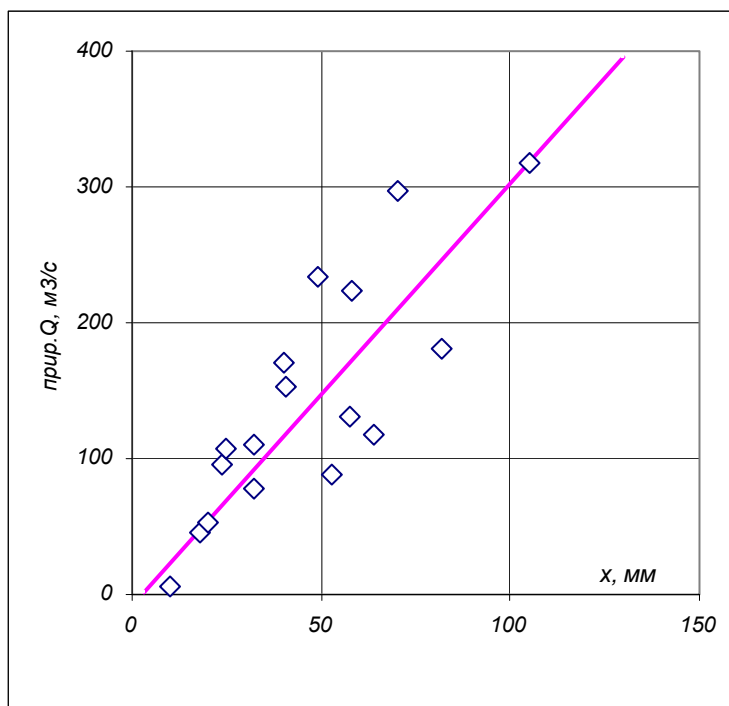


Рис.12. Зависимость приращения расхода воды в первые сутки паводка от суммарного слоя осадков, выпавших накануне и в день паводка, на водосбор для р. Белая –Каменноостская.

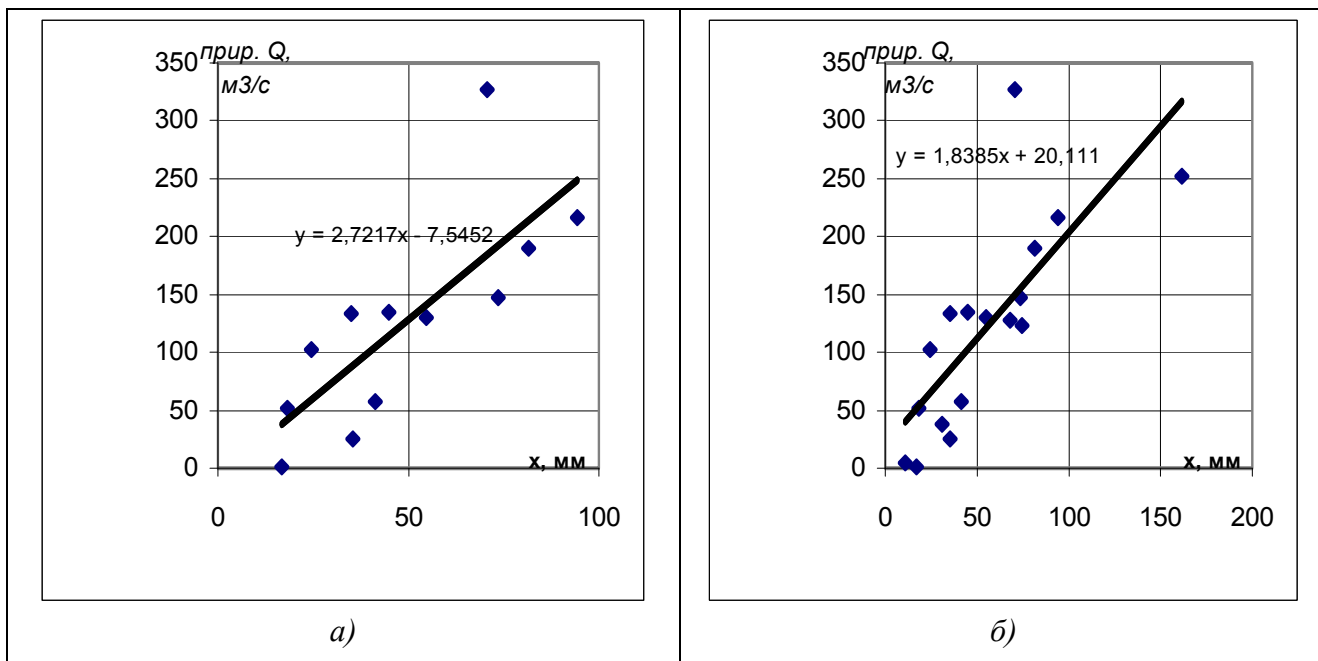
По метеостанции п.Гузерибль нет данных наблюдений за 1993 г., в течение которого прошло 5 высоких паводков из 17. Поэтому для ряда точек величина X получена только по осадкам, измеренным на станциях Каменноостская и Даховская, расположенным близко друг к другу, что не отразилось на качестве следующей зависимости:

$$\Delta Q = 2.8X + 12.9,$$

коэффициент корреляции, которой составил 0.82. Если не учитывать распределение количества выпадающих осадков по высоте местности и рассчитывать показатель X как среднее по трем станциям, то коэффициент аналогичной зависимости снизится до 0,65,

В бассейне р. Пшеха до замыкающего створа в п. Апшеронск расположены метеостанции п.Апшеронск и п.Черниговское. Кроме данных наблюдений на этих станциях использовались данные станции п.Гузерибль, расположенной в бассейне р. Белой примерно в 15 км от истоков р. Пшехи (рис.1). Зависимость приращения расхода воды на р.Пшехе в п.Апшеронск в первый день паводка получена аналогично зависимости для створа в п.Каменноостская на р. Белой и приведена на рис.12.

Использование данных станций Апшеронск и Черниговская за 1993 г. вместо отсутствующих данных по станции Гузерибль понижает коэффициент корреляции незначительно (0.77 вместо 0.79), но увеличение числа точек аппроксимации делает более надежной зависимость (рис. 13б):



а) без учета данных станции п.Гузерицль за 1993 г.; б) с учетом данных других станций за 1993 г.

Рис.13. Зависимость приращения расхода воды в первые сутки паводка от суммарного слоя осадков, выпавших накануне и в день паводка, на водосбор для р. Пшеха-п.Апшеронск.

Сама зависимость имеет следующий вид:

$$Y = 1,84X + 20,1.$$

Во втором варианте в отличие от приведенных выше зависимостей ΔQ от слоя осадков, выпавших накануне и в данные сутки, зависимость для р. Пшиш – п.Хадыженск получена по слою осадков только за первые сутки паводка. Привлечение величин осадков накануне паводка приводит к резкому ухудшению качества зависимости, что скорее всего связано с особенностями формирования дождевых паводков на данном водосборе (например, высокая степень залесенности – более 90%, особенности почвенного покрова и пр.). Осадки рассчитывались по данным наблюдений на метеостанциях п.Хадыженск и п.Горная (бывшая Гойтх), которые расположены в пределах бассейна (рис.1). Полученная зависимость представлена на рис.14.

В 3 случаях из 17 на р. Пшиш в створе п.Хадыженск паводок не сформировался. В некоторых случаях максимальные расходы воды проходили не в первый день паводка. В связи с этим для построения зависимости, приведенной на рис. 14, были привлечены дополнительные данные о других высоких паводках, имевших место в 1992-2002 гг. Полученная зависимость

$$\Delta Q = 2.18X - 26.6,$$

имеет коэффициент корреляции 0.86.

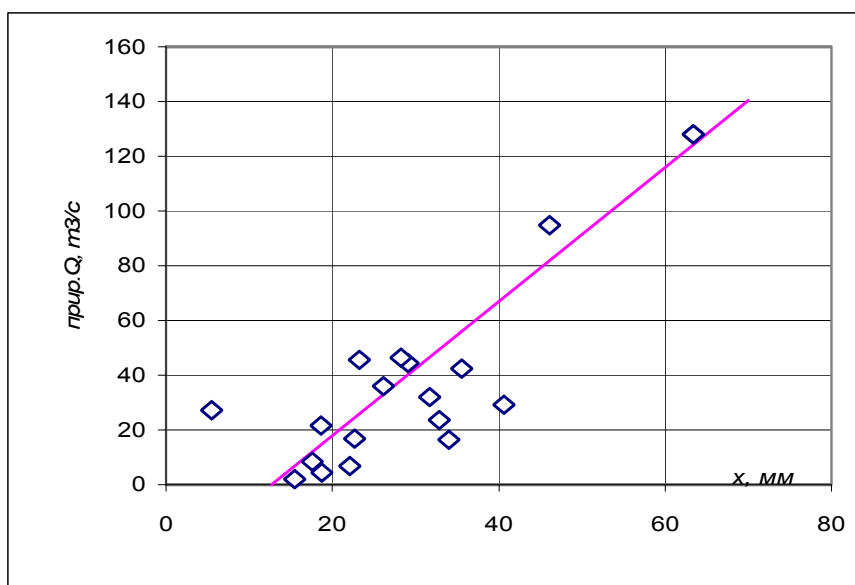


Рис.14. Зависимость приращения расхода воды в первые сутки паводка от суммарного слоя осадков, выпавших в день паводка на водосбор, для р. Пшиш-п.Хадыженск.

В табл. 7 для периода 1992-2002 гг. приведены данные о паводках, максимальные суточные расходы которых превысили $280 \text{ м}^3/\text{с}$ (при прохождении таких паводков вероятность превышения уровня ОЯ составляет 84%), в табл. 8 – о паводках с расходами $200\text{-}280 \text{ м}^3/\text{с}$ (вероятность превышения ОЯ – 10%).

Таблица 7

Сведения об опасных паводках на р. Псекупс – п.Горячий Ключ

NN	Максимальный уровень		Расход, $\text{м}^3/\text{с}$	Слой стока, мм	Максимальные осадки		Талый слой h , мм	$X+h$, мм
	дата	см			дата	слой X, мм		
1	20.11.94	307	316	35,7	20.11.94	41,4	13	54,5
2	18.04.96	340	456	51,5	18.04.96	47,7	0	47,7
3	24.12.96	314	382	43,1	24.12.96	63	0	63
4	06.01.97	351	370	41,8	06.01.97	52,7	18	70,7
5	26.10.97	326	303	34,2	26.10.97	63	0	63
6	10.01.98	340	319	36	10.01.98	83,2	0	83,2*
7	10.12.98	307	301	34	10.12.98	60,6	0	60,6
8	01.01.02	303	311	35,1	01.01.02	84,8	0	84,8*
9	11.11.02	274	300	33,9	11.11.02	54,2	0	54,2

*Осадки выпадали при отрицательной или близкой к нулю температуре воздуха.

Таблица 8

Сведения о сильных паводках на р. Псекупс –п. Горячий Ключ

NN	Максимальный уровень		Расход, $\text{м}^3/\text{с}$	Слой стока, мм	Максимальные осадки		Талый слой h , мм	$X+h$, мм
	дата	см			дата	слой X, мм		
1	18.01.92	331	268	30,3	17.01.92	35,7	0	35,7

2	18.07.92	312	233	26,3	18.07.92	86	0	86**
3	15.11.92	290	202	22,8	15.11.92	31,9	0	31,9
4	28.11.92	312	227	25,6	28.11.92	34,7	0	34,7
5	26.01.93	331	257	29	25.01.93	45,2	0	45,2
6	14.12.94	292	271	30,6	14.12.94	37,7	10	47,7
7	21.11.95	262	210	23,7	21.11.95	38,4	0	38,4
8	08.02.96	246	230	26	08.02.96	10	27	37
9	19.10.97	297	211	23,8	19.10.97	47	0	47
10	08.12.97	292	213	24	08.12.97	54,4	0	54,4
11	19.01.00	312	237	26,8	18.01.00	52	3	55

**Осадки выпали после длительного перерыва.

Как видно из приведенных данных в летнее время сформировался только один высокий паводок – 18 июля 1992 г. Коэффициент стока составляет 0,3, что значительно ниже его значений для других паводков. Из 20 паводков 5 были сформированы с участием талой воды, причем только в одном случае она преобладала как источник питания реки.

По данным табл. 7 и 8 получена зависимость максимального суточного слоя стока за паводок на р. Псекупс в створе п.Горячий Ключ от слоя поступления воды на водосбор, рассчитанного по данным наблюдений на метеостанциях п.Горячий Ключ (в бассейне) и п.Горный (в соседнем бассейне на расстоянии около 20 км от верховья реки). Она представлена на рис.15.

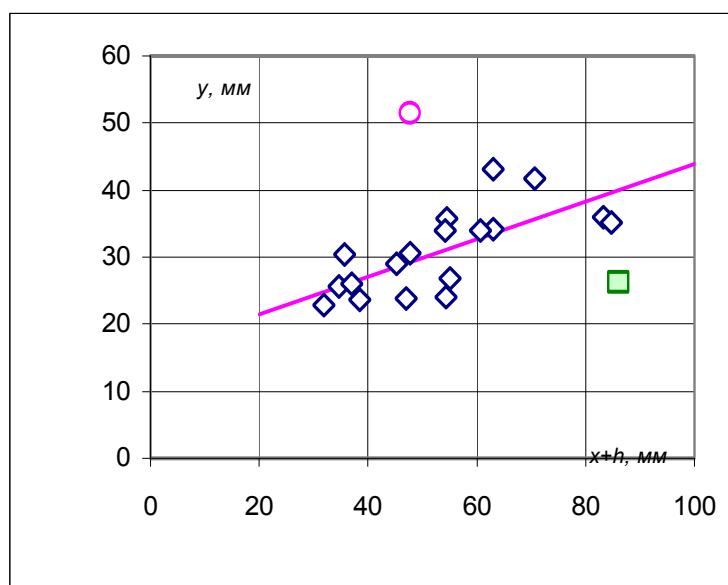


Рис.15. Зависимость максимального суточного слоя за паводок от слоя поступления воды на поверхность водосбора р. Псекупс-Горячий Ключ.

На графике, представленном на рис. 15, точка, обозначенная квадратиками, соответствует паводку 18 июля 1992 г., имеющему низкий коэффициент стока, что связано с большими начальными потерями осадков, формирующими паводок, либо с ошибками в данных наблюдений. Это дает основание не учитывать данный паводок при аппроксимации зависимости. Точка, обозначенная кружком, соответствует паводку 18 апреля 1996 г. с коэффициентом стока выше 1, что также делает ее непригодной для использования в выборке. Зависимость, полученная по оставшимся 18 точкам, обозначенным ромбами, имеет коэффициент корреляции 0,71:

$$y = 0.28(X + h) + 15.9.$$

Приведенные эмпирические зависимости носят исследовательский характер, поэтому не была произведена оценка точности получаемых по ним прогнозов на зависимом и

независимом материале. Однако довольно высокая теснота связи полученных эмпирических зависимостей свидетельствует о возможности их использования в будущем для выпуска прогнозов максимального паводочного стока юго-западных притоков р. Кубани.

Эмпирический способ краткосрочного прогноза максимального стока за паводке удается построить, используя нелинейные, в частности, квадратичные зависимости его от суммы осадков за время выпадения дождя и от предпаводочного стока, который служит косвенным показателем влагоемкости бассейна перед выпадением дождя. Аппроксимация такой зависимости приводится в табл. 9.

Таблица 9

Коэффициенты квадратической аппроксимации $y(q)=aq^2+bq+c$ зависимости максимального слоя стока за паводок (y , мм) р. Фарс – п. Дондуковская от предпаводочного слоя стока (q , мм) и суммы осадков за время выпадения дождя, вызвавшего паводок (X , мм)

N ур-ния	Коэффициенты аппроксимации			q , мм	x , мм
	a	b	c		
1	-7.5	449	0.0	<4	35÷50
2	-0.16	43.38	65.0	>4	35÷50
3	-3.0	425.0	0.0	<4	25÷35
4	-0.12	3.25	41.0	>4	25÷35
5	-0.5	48.0	0.0	<4	0÷25
6	-0.22	5.12	7.0	>4	0÷25

В этой зависимости сумма осадков за время выпадения дождя подразделяется на три градации- 0-25 мм, 25-35 мм, 35-50 мм, что улучшает точность зависимости. Слой стока, предшествующий паводку, вначале до определенной величины (4 мм) относительно хорошо характеризует будущие потери стока, а затем его влияние идет на убыль тем скорее, чем больше осадков выпадет за паводок.

Разработанная зависимость недостаточно точна для составления надежных прогнозов, но может вполне, с одной стороны, служить для экстренных консультаций в опасных случаях, с другой стороны, может служить для дальнейшего совершенствования методов прогнозов.

На рис. 16 и 17 приводятся зависимости срочных и суточных максимальных расходов от максимальной интенсивности выпадения дождя и влагоемкости бассейна накануне паводка.

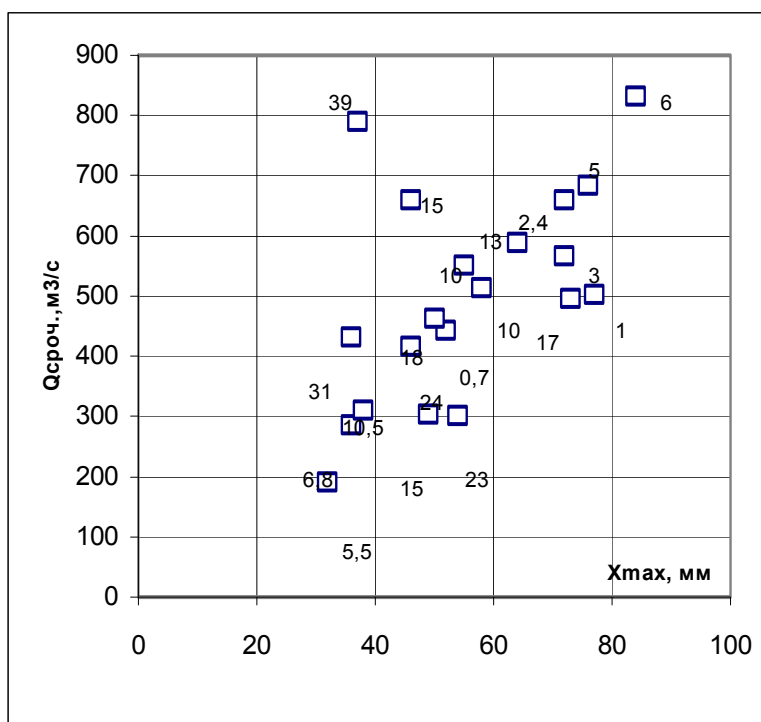


Рис. 16. Зависимость срочных максимальных расходов (Q - срочный) от максимального слоя дождя (X_{max}) и влагоемкости бассейна накануне паводка (числа у точек).

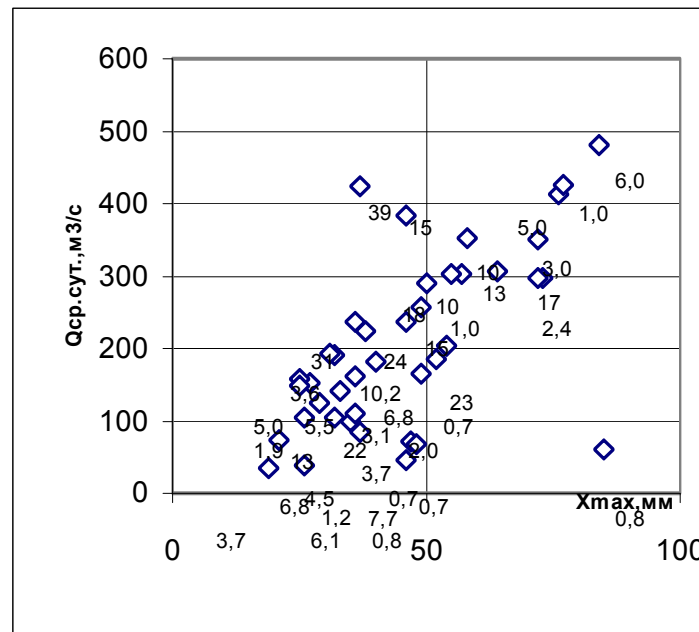


Рис. 17. Зависимость суточных максимальных расходов (Q суточный) от максимального слоя дождя (X_{max}) и влагоемкости бассейна накануне паводка (числа у точек).

Эти зависимости пока также применимы лишь для консультаций в ожидании опасных ситуаций. К опасным ситуациям относятся такие, когда бассейн сильно увлажнен и ожидаются интенсивные, продолжительные или охватывающие большие территории осадки.

В дальнейшем, скорее всего, необходимо строить исследования на разработке и использовании методов прогнозов полей осадков, привязки их “ядер” к конкретным местностям, а также наращивать детализацию разработок всех видов прогнозов для такой сложной системы, как бассейн Кубани.

Список литературы

1. Денисов Ю. М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. Л.: Гидрометеиздат, 1965, 295 с.
2. Б.М.Доброумов, С.М.Тумановская. Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология,- 2002, - N12, - С.70-78.
3. Комаров В. Д., Мухин В.М., Полунин А. Я. Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра. - 1976. - Вып. - 163, - С. 38-57.
4. Мухин В. М., Полунин А. Я. Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока (на примере р. Карадарьи) - М.: Гидрометеиздат, 1982, 148 с.
5. Мухин В.М. Применение математического моделирования в сочетании с эмпирическими методами в долгосрочных прогнозах стока горных рек. //Труды Гидрометцентра СССР. – 1988. - Вып. - 295, - С. 38 -49.
6. Полунин А. Я. О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра. – 1988. - Вып. 295, - С. 69-79.
7. Федорова Ю. В. Осадки в бассейне р. Риони // Метеорология и гидрология. – 2000. - № 8. - С. 102–110.