

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РФ**  
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
ГУ «Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт»

УДК 556.5.048 556.5.06  
№ гос. регистрации 01200964775  
Инв. № 02201054025

Утверждаю:  
Директор ГУ «СибНИГМИ»,  
доктор физ.-мат. наук  
В. Н. Крупчатников  
« 12 » \_\_\_\_\_ 2010 г.



**ОТЧЁТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**  
**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА**  
**РАСЧЕТА ПРОГНОЗОВ ПОЛЕЗНОГО ПРИТОКА В ОЗ. БАЙКАЛ НА**  
**3-ТИЙ КВАРТАЛ, ВКЛЮЧЕНИЕ МЕТОДА В ТЕХНОЛОГИЮ**  
**«КАССАНДРА-СИБИРЬ»**  
(заключительный)  
шифр темы 8.80

Руководитель НИР,  
заведующий отделом  
гидрометеорологических и экологических исследований  
ГУ «СибНИГМИ»,  
кандидат физ.-мат. наук  Н. Н. Завалишин

Новосибирск, 2010

Список исполнителей:

Завалишин Н. Н.  руководитель темы,  
ответственный исполнитель,  
заведующий отделом  
гидрометеорологических и  
экологических исследований  
ГУ «СибНИГМИ»,  
кандидат физ.-мат. наук

Пальчикова Н. В. Пальчикова научный сотрудник ГУ «СибНИГМИ»,  
интерфейс технологии  
«Кассандра-Сибирь»

Якимова Н. И.  начальник отдела гидрологических  
прогнозов ГУ «Иркутский ЦГМС-Р»,  
подготовка массивов первичных данных,  
оценка качества прогнозов,  
освоение работы с технологией  
«Кассандра-Сибирь»

Панькова Т.П.  нормоконтролер

## РЕФЕРАТ

Отчёт 32 стр., 4 разд., 6 илл., 3 табл., 11 источников.

БАЙКАЛ, ПОЛЕЗНЫЙ ПРИТОК, 3-тий КВАРТАЛ, ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ, АЛГОРИТМ ПРОГНОЗА, «КАССАНДРА-СИБИРЬ».

Объект исследования: полезный приток в оз. Байкал в июле, августе, сентябре и в целом по 3-му кварталу.

Цель работы: разработка, создание и автоматизация расчёта долгосрочного прогноза полезного притока в оз. Байкал на 3-ий квартал с детализацией по месяцам квартала.

Метод проведения работы: разработанный ранее метод прогноза усовершенствуется и устанавливается в технологию подготовки долгосрочных гидрометеорологических прогнозов «Кассанда-Сибирь».

Значимость работы: новый метод автоматизированного вычисления прогноза полезного притока в оз. Байкал на 3-й квартал.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Раздел 1. Исходные данные	8
Раздел 2. Низкочастотные компоненты	
2.1. Локальные нормы	12
2.2. Тренды минимального и максимального притоков	19
Раздел 3. Высокочастотные компоненты	
3.1. Периодические компоненты	22
3.2. Гармонические компоненты	24
Раздел 4. Подготовка и оценка прогноза	
4.1. Алгоритм прогноза	26
4.2. Качество прогноза	29
Заключение	31
Список использованных источников	32

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ГУ «СибНИГМИ»	Государственное учреждение «Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт»
ГУ «Иркутский ЦГМС-Р»	Государственное учреждение «Иркутский центр по гидрометеорологии и охране окружающей среды с региональными функциями»
Иркутское УГМС	Иркутское межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ЛК-модель	Локально-климатическая модель
СВ	случайная величина
МО	математическое ожидание
СКО	среднеквадратическое отклонение
$N(0, \sigma)$	нормальный закон распределения с нулевым МО и СКО, равным $\sigma$

*«В чём отличие теоретика от практика?»  
- Теоретик делает то, что можно, так, как нужно.  
Практик делает то, что нужно, так, как можно».  
Народная мудрость.*

## ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного планирования работы Иркутской ГЭС и работы водохранилищ Ангарского каскада, имеющих комплексное многоотраслевое назначение, необходимо повышение точности прогнозов полезного притока в оз. Байкал, в первую очередь по наиболее сложному 3-му кварталу. Сложность определяется, прежде всего, низкой предсказуемостью летних осадков, особенно, в Забайкалье, изрезанном хребтами с перепадами высот в 1-2 км и расположенном на стыке двух синоптических районов /1/.

В основу работы были положены результаты исследований А.Н.Афанасьева, И.П.Дружинина и других: «Таким образом, приходим к выводу, что главнейшие элементы водного баланса оз. Байкал — приток воды и стояние уровня — отражают через циркуляцию воздуха и элементы климата современные циклические колебания солнечной активности» /2, с.41/. И.П.Дружинин показал существование «солнечно-обусловленных переломов в ходе гидрометеорологических процессов» /3,4/, а Yamamoto R. и др. /5/ подтвердили существование «климатических скачков» в гидрометеорологических процессах Северного полушария.

Стало ясно, что исследуемые процессы существенно нестационарны как по математическому ожиданию, так и по автоковариационной функции, и поэтому применение классических методов, опирающихся на гипотезу о стационарности, здесь будет неэффективно. Из литературы известны различные подходы к учёту нестационарности, например /6,7,8 и др./ . Однако, применить их порой бывает затруднительно по той причине, что ряд полезного притока очень короткий — месячные данные известны с 1933 года.

С учётом указанных обстоятельств были разработаны оригинальные алгоритмы учёта нестационарности, которые опираются на разделение по факторам, формирующим разные части притока: медленно меняющиеся факторы, быстроменяющиеся и создающие экстремальные выбросы притока.

В первой главе рассматривается понятие полезного притока, объясняется происхождение исходных данных, анализ которых будет производиться в последующих разделах. Приводятся как сами первичные данные, так и основные статистические показатели.

Во второй главе методика оценки нестационарности по МО с помощью кусочно-линейных функций применяется в упрощённом виде, пригодном для быстрого практического применения, к выявлению переломов в рядах полезного притока оз. Байкал, как по месяцам, так и по кварталу в целом. Излагается оригинальный метод оценки локальных норм гидрометеоэлементов.

Третья глава посвящена изложению методики оценки быстрых переменных. Метод Бюй-Балло расширяется на периоды, некратные шагу по времени, и применяется к анализируемым рядам с целью выяснения формы периодических быстроменяющихся компонент в рядах полезного притока. Излагается алгоритм выделения гармонических компонент с помощью метода Лагранжа-Дейля.

В четвёртой главе подробно объясняется алгоритм подготовки прогноза на примере 2009 года. Там же подводятся итоги оценки качества созданного метода по сравнению с предшествующим периодом 2005-2007 гг.

В заключении подводятся итоги, и формулируется перспектива дальнейших исследований.

Исследования проводились в рамках темы 8.80 НИОКР по Плану Росгидромета 2008-2009 гг.

## РАЗДЕЛ 1

### Исходные данные

Под полезным притоком в водоём понимается разность объёмов воды на конец и начало периода, отнесённая к длине периода:

$$Q_{\text{пол}} = \frac{V(T_2) - V(T_1)}{T_2 - T_1},$$

где  $V(T)$  – объём воды в водоёме в момент времени  $T$ .

По оз. Байкал ряды полезного притока месячного разрешения известны с 1933 года, причём до 1955 года они рассчитывались по методике Гидропроекта, а с 1956 года по формуле

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{сброс}} \pm Q_{\text{акк}} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{сброс}}$  — сброс воды через Иркутскую ГЭС;

$Q_{\text{акк}}$  – аккумулярованный объём воды за месяц.

Можно оценить  $Q_{\text{пол}}$  с помощью формулы:

$$Q_{\text{пол}} = (H_2 - H_1)S / (T_2 - T_1),$$

где  $H_1, H_2$  – уровни оз. Байкал в моменты  $T_1$  и  $T_2$ , соответственно.

$S$  – площадь зеркала оз. Байкал на уровне  $(H_1 + H_2) / 2$ .

Данные, рассчитанные по формуле (1), публикуются в Гидрологических ежегодниках. В таблице 1 собраны статистики полезного притока в оз. Байкал месячного разрешения за период 1933-2009 гг., а в таблице 2 представлены исходные данные.

Таблица 1 - Статистики полезного притока в оз. Байкал

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	3 кв
Ср.знач	302	408	367	873	3034	4909	4829	4205	2964	1191	-83	-191	3999
Медиана	290	390	370	848	2870	4790	4600	4200	2830	1120	-121	-164	3917
СКО	201	146	118	251	686	1134	1344	1210	1035	451	281	204	981
Макс	852	1080	746	1820	5240	9060	8490	7910	6160	2380	705	290	7130
Мин	-140	54	17	300	1650	2730	1970	2030	1290	210	-803	-727	2067
Размах	992	1026	729	1520	3590	6330	6520	5880	4870	2170	1508	1017	5063

Таблица 2 – Байкал, полезный приток м<sup>3</sup>/сек

Год	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
1933	614	54	251	885	3530	6140	6900	5180	3340	1640	252	-193
1934	643	438	379	1160	1750	3460	5020	4390	3340	880	304	-245
1935	422	517	17	581	2870	5570	6170	5590	1930	1180	113	-727
1936	484	127	582	682	4310	9060	4750	3840	4260	1570	137	-28
1937	569	338	444	731	3900	5110	5740	4890	3600	1610	-288	-133
1938	358	779	572	1440	3050	7930	7280	4250	6160	2240	705	50
1939	411	628	371	1820	2730	5390	3930	2710	1790	293	-278	-212
1940	196	520	359	1100	3060	5510	7270	5340	3530	1350	-95	-407
1941	852	403	609	691	3750	6210	4670	4570	4150	1150	-43	-140
1942	563	434	273	638	2310	6020	7900	3810	2120	733	-459	174
1943	-140	1080	301	1360	3870	4110	3580	2830	2960	1120	-121	-20
1944	496	687	402	1140	3130	4930	4190	4170	2060	1100	-384	-53
1945	261	520	632	1000	3000	3420	4600	4430	4320	1930	216	-480
1946	706	312	499	1120	2330	4560	3380	3150	2000	1100	-314	40
1947	228	122	746	902	2200	4090	4720	3800	3370	1520	-230	-357
1948	83	723	178	1390	2550	4610	5550	4800	4920	1620	190	96
1949	244	387	378	927	3370	4480	5570	4600	4380	1840	-157	-101
1950	409	294	414	871	3270	3850	3940	5340	3210	1210	-733	-43
1951	577	422	386	848	5240	5100	4460	3710	3020	1710	296	-391
1952	203	462	541	1000	3800	6250	5320	6330	3180	1270	-511	138
1953	842	258	566	1060	3300	4790	4390	3310	1870	1040	-366	-161
1954	10	278	489	392	1650	3850	4760	3200	1510	850	-296	-282
1955	341	700	443	600	3400	5480	3790	3010	2690	1070	24	-614
1956	-34	466	235	595	2770	4920	4870	4280	2830	799	12	-153
1957	515	194	299	780	2830	4630	3300	4130	3260	1440	-216	-131
1958	328	351	317	706	2820	4330	3320	2820	1390	854	-803	-119
1959	-110	299	327	877	2550	6710	4660	5760	3790	1440	-80	-70
1960	440	440	400	719	2300	5510	4860	4320	4130	1230	520	-420
1961	320	440	500	1130	2650	4020	4530	5260	3690	1350	-200	-30
1962	260	550	470	874	3150	5390	7540	4260	3210	1410	-330	-50
1963	270	390	410	779	2470	4430	5540	3820	2950	1200	-10	-90
1964	290	310	380	793	3990	4420	4600	3490	3560	1120	310	-130
1965	380	360	200	1010	2860	4050	3200	5100	2420	1660	-130	-600
1966	340	410	370	460	3420	5240	7150	4720	2660	1210	-130	-190
1967	260	370	330	1080	3870	3700	5160	5010	3330	1780	-150	60
1968	410	440	340	1290	4220	4980	4480	3580	2110	1070	-150	-350
1969	150	340	250	710	2400	4040	3100	4210	3780	1420	-220	-230
1970	90	390	400	587	4390	5640	4300	3110	3420	1170	-180	-120
1971	200	380	370	790	2830	5800	7500	6750	2830	980	40	-710
1972	130	420	250	840	2060	2740	4650	2570	1650	590	-290	-210
1973	10	440	370	541	3040	6290	8260	7910	5220	1460	490	140
1974	160	490	490	890	2560	5340	3810	3220	2350	820	-160	-160

Продолжение таблицы 2

Год	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
1975	440	390	360	830	4260	5550	4760	4600	2630	930	-190	-240
1976	80	470	220	510	2560	3920	4740	4540	2470	802	-370	-120
1977	200	330	320	839	2760	5970	3710	2480	1510	210	-110	-270
1978	-50	250	210	721	2050	4490	4950	3040	1990	807	-250	-390
1979	350	330	320	590	3410	3960	2230	2330	1640	300	-320	-280
1980	160	310	150	300	2540	5320	4190	2680	1640	450	-330	-310
1981	330	280	320	1060	3140	3020	3350	2670	2360	615	-480	-310
1982	100	317	210	959	2210	5010	5700	5100	2670	1090	-120	-70
1983	559	220	400	639	2700	4680	6710	5220	3630	1450	200	-290
1984	50	430	220	640	4180	4790	4060	4060	3950	1810	250	-130
1985	350	440	430	830	3370	7790	5650	6110	3820	1830	190	90
1986	550	490	480	750	3460	6340	5100	3240	2220	988	-70	-530
1987	290	460	320	620	2320	4090	2730	3010	2530	728	-460	-280
1988	406	400	150	611	3060	6070	8490	5920	5110	1530	80	0
1989	190	520	380	1040	2294	3900	4240	3740	1976	912	-370	-220
1990	110	470	370	820	2710	3590	5760	5960	4230	2380	180	-240
1991	280	430	340	780	3500	4550	6280	4430	3560	1490	110	160
1992	570	370	450	1080	3800	4950	3150	3510	4500	1670	-100	290
1993	420	390	430	930	2430	3770	4030	7800	4130	2060	530	-410
1994	300	350	350	900	2800	4500	5450	4800	4700	1900	300	0
1995	291	557	419	1180	3200	5850	5680	4200	2440	1050	-190	-270
1996	65	280	400	733	2747	4430	4050	3070	1750	650	-300	-280
1997	367	322	340	1050	2750	4100	4130	4490	2360	1060	-130	-590
1998	185	333	267	823	2350	4210	4520	6300	3430	1660	175	-40
1999	352	425	350	950	3620	3270	3700	3380	2070	914	-67	-164
2000	220	326	410	915	3170	3790	4080	4470	2801	1100	-250	-330
2001	500	400	430	1030	3900	4220	5230	4200	2730	1120	340	-83
2002	270	420	330	1010	3860	4770	4520	2800	1290	530	-240	-260
2003	340	350	340	760	2460	2730	1970	4670	2930	1092	-14	-270
2004	85	450	360	1044	3600	5200	4270	3030	2600	995	-54	-154
2005	150	430	331	900	2500	5000	3620	3000	1530	456	-115	-348
2006	210	370	312	750	2920	6360	5220	3630	1950	840	-200	-120
2007	350	374	389	1080	2400	5300	4120	2030	1620	762	-270	-250
2008	190	380	280	690	2310	5800	4520	4120	2790	1260	104	
2009	200	360	350	1060	2700	4600	4200	3600	2400	1200	-100	

Графическое отображение рядов полезного притока третьего квартала представлено на рисунке 1.

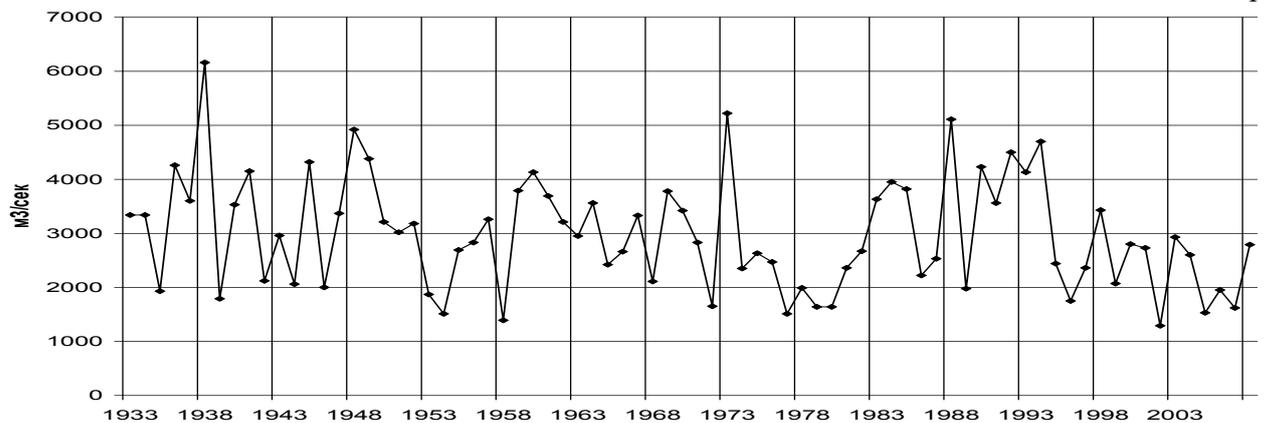
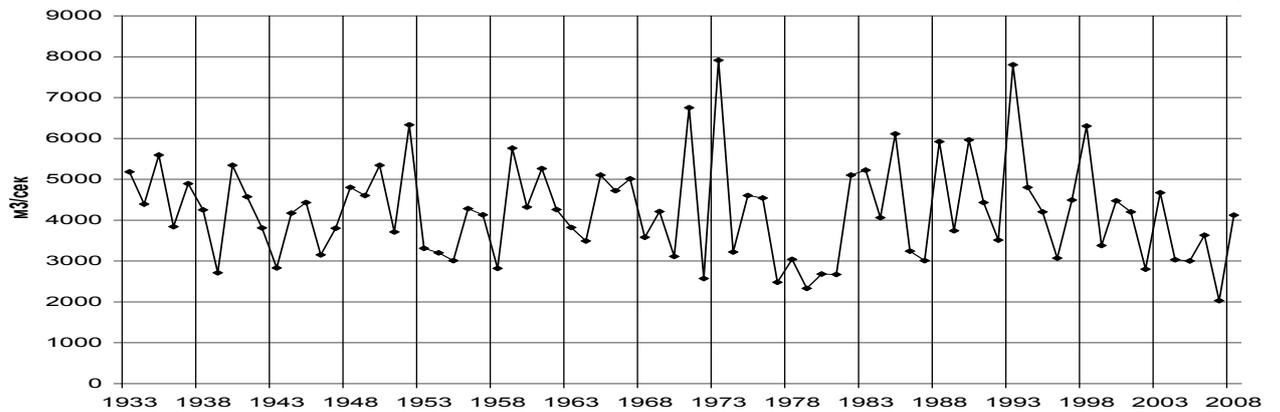
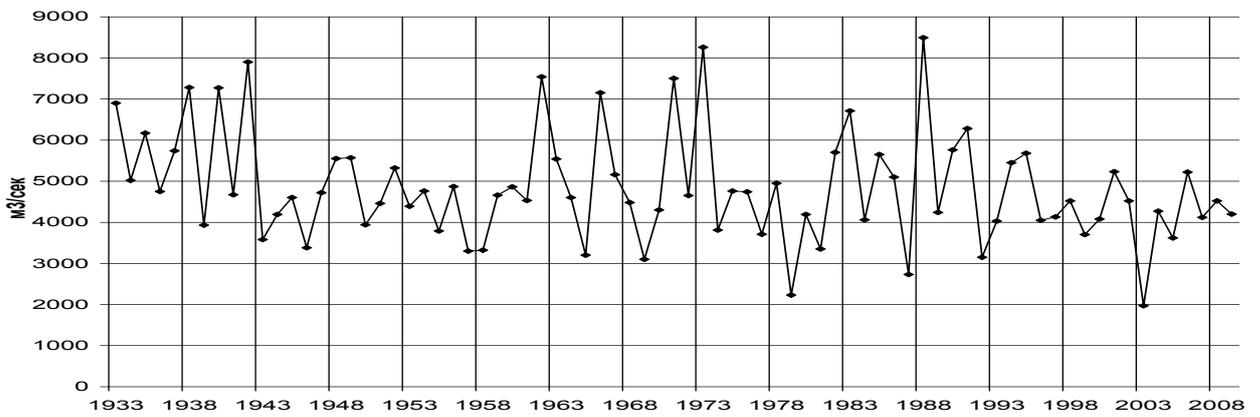
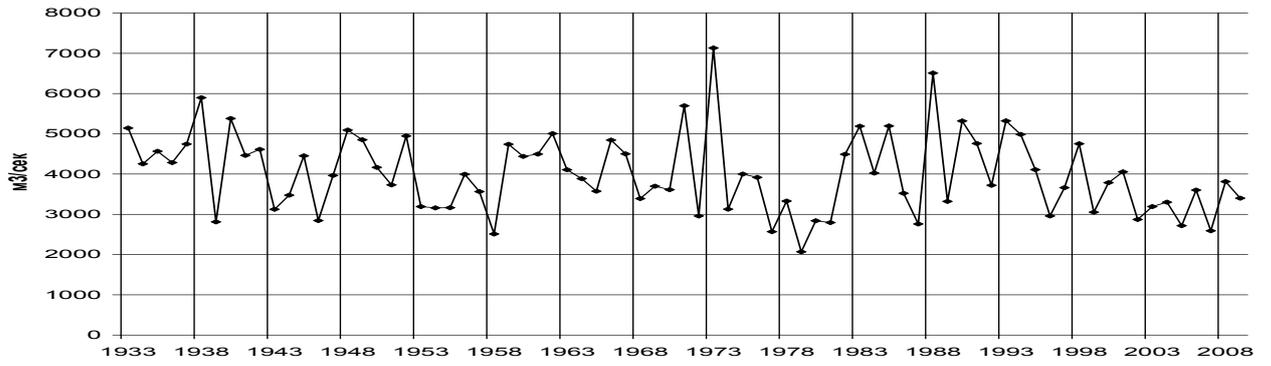


Рисунок 1- Полезный приток в озеро Байкал (м<sup>3</sup>/сек).

## РАЗДЕЛ 2

### Низкочастотные компоненты

#### 2.1 Локальные нормы

Предположим, что случайный процесс  $\xi(t)$  определён на интервалах времени  $I_k=(t_{k-1}, t_k)$ ,  $k=1, m$  и имеет вид:

$$\xi(t) = M(t) + E(t), \quad (2)$$

где  $E(t)$  – «белый шум» с нормальным распределением  $N(0, \sigma)$  в любом сечении процесса;

$M(t)$  – математическое ожидание (МО) процесса  $\xi(t)$ , имеющее вид

$$M(t) = \sum_{k=1}^m a_k \chi_k(t); \quad (3)$$

здесь  $\chi_k(t)$  – характеристическая функция интервала  $I_k$ ;

$a_k$  – константа, которую будем называть «локальной нормой».

Локальные нормы в применении к притоку – это, по сути, средние значения притока в сериях лет повышенной или пониженной водности, о которых говорил И.П.Дружинин. И пусть известна единственная выборка из процесса:  $x_j = \xi(t_j)$ ,  $j=1, n$ .

Как получить эффективную оценку локальных норм какого-либо гидрометеозлемента, если его статистическая структура определена условиями (2), (3)?

Для этого нужно решить две задачи: во-первых, разбить весь интервал  $I=[t_0, t_n]$  на интервалы  $I_k$ , ( $k=1, m$ ); во-вторых, на каждом из найденных интервалов оценить значения локальных норм.

Начнём с первой. Эффективность выявления скачка в МО определяется соотношением «сигнал-шум», которое в рассматриваемой схеме равно  $|a_k - a_{k-1}|/\sigma$ . Если это соотношение близко к нулю и объём выборки ограничен, то уверенно уловить переход от одной локальной нормы к другой не удастся. В

этом случае, с практической точки зрения, по-видимому, и нет большой нужды его искать. При заметном уровне сигнала на фоне шума оценку можно получить двумя путями: или по исходному ряду данных, или по ряду с отфильтрованной высокочастотной компонентой. В обоих случаях задача решается с применением Локально-климатической модели (ЛК-модели) /9/, но второй путь более прост в вычислениях, при примерно такой же эффективности.

Рассмотрим алгоритм упрощённого варианта выявления локальных норм.

1. По выборке  $\{x_k\}$  вычисляем среднее значение и оценку СКО ряда:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad s = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2.$$

2. Центрируем и нормируем ряд:

$$y_k = \frac{x_k - \bar{x}}{s}.$$

3. Переходим к интегрированному ряду:

$$Z_k = \sum_{j=1}^k y_j.$$

4. Проверяем, отличается ли ряд от шумовой компоненты. Предполагая нормальность  $N(0,1)$  распределения и некоррелированность ряда  $Z_k$ , проверяем, выполнимость неравенств

$$|Z_k| < t_\alpha \sqrt{\frac{k(n-k)}{n}}$$

Если ряд  $Z_k$  не выходит за границы, то у нас нет оснований предполагать наличие локальных норм (на уровне значимости  $\alpha$ ). В этом случае работа алгоритма заканчивается.

5. Фиксируем локальные экстремумы функции  $Z_k$ , начиная с самых больших максимумов (и самых глубоких минимумов), соблюдая при этом условие, чтобы между соседними экстремумами было не менее 5 точек. Найденные локальные экстремумы  $Z_{kj}$  упорядочиваем в порядке возрастания:

$$\mathbf{Z} = (Z_{k1}, Z_{k2}, \dots, Z_{km}).$$

Вектор  $Z$  является решением первой задачи о выделении участков с локальными нормами.

б. Переходим к оценке локальных норм. Для этого на каждом из найденных интервалов  $I_1=[1,k_1], I_2=[k_1+1,k_2], \dots, I_m=[k_{m-1}+1,k_m]$  вычисляем среднее значение  $a_k, k=1, \dots, m$ . Коэффициенты  $\{a_k\}$  и есть искомые оценки локальных норм на выделенных интервалах  $I_k$ .

Найдём локальные нормы полезного притока в оз. Байкал по месяцам 3-го квартала и по кварталу в целом. Среднее и СКО на интервале 1933-2009 гг. представлены в таблице 1. Сумма аномалий рядов (с 5% доверительной границей), центрированная средним и нормированная СКО, вместе с выделенными локальными нормами представлена на рисунках 2–5. Из рисунков видно, что все ряды отличается от случайного ряда. Особенно отметим, что локальные нормы полезного притока 3-го квартала имеют два основных состояния:

либо 3000-3300 м<sup>3</sup>/сек,

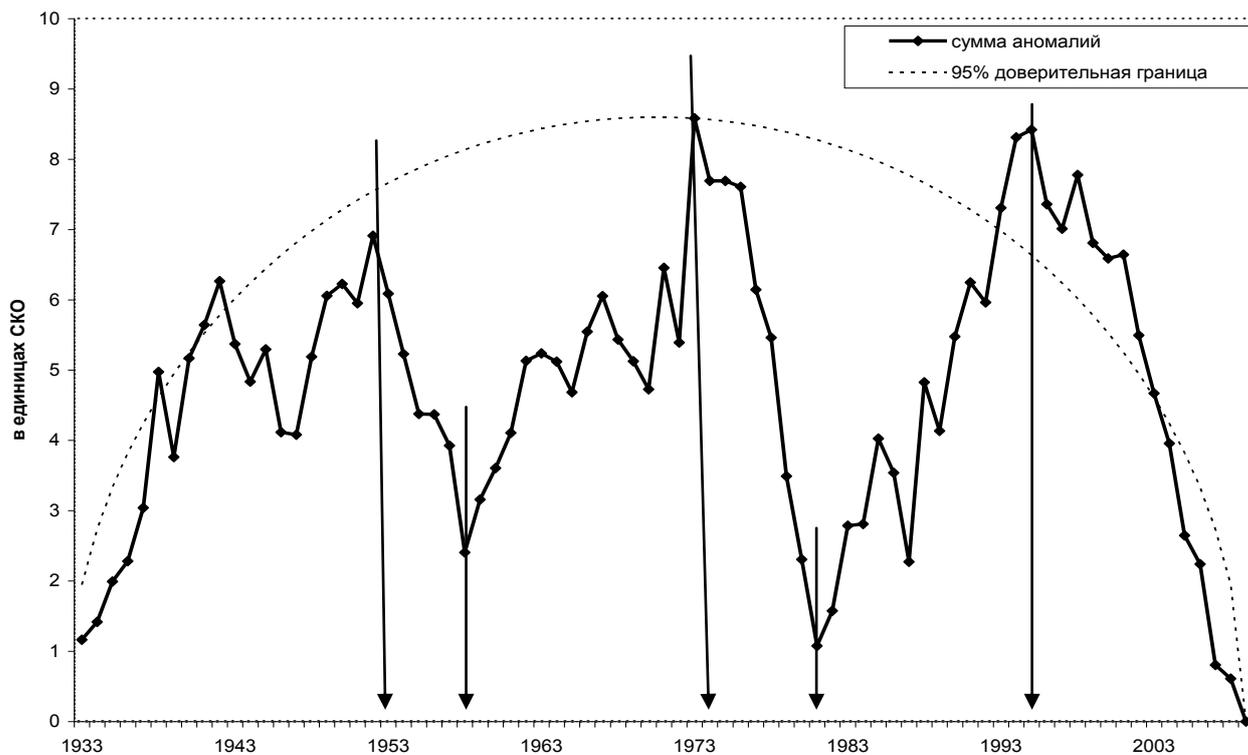
либо 4300-4500 м<sup>3</sup>/сек.

Следовательно, в ближайший период, как видно из графика на рисунке 2, следует ожидать перехода к серии лет повышенного полезного притока в 3-м квартале, то есть к локальной норме 4300-4500 м<sup>3</sup>/сек.

Медленно меняющиеся факторы имеют двоякое проявление. Во-первых, они формируют серии лет повышенной или пониженной водности, причём переходы от одной серии к другой имеют солнечно-обусловленную природу.

Во-вторых, эта группа факторов обеспечивает повышение или понижение экстремальных значений, создавая своего рода конусы, составленные из пар прямых линий (оггибающих), проходящих через максимумы и минимумы притока. Кроме того, внутри конусов также могут проявляться эти факторы в форме отрезков трендов, к которым тяготеют группы лет внутри серий. Рассмотрим этот эффект более подробно.

А)



Б)

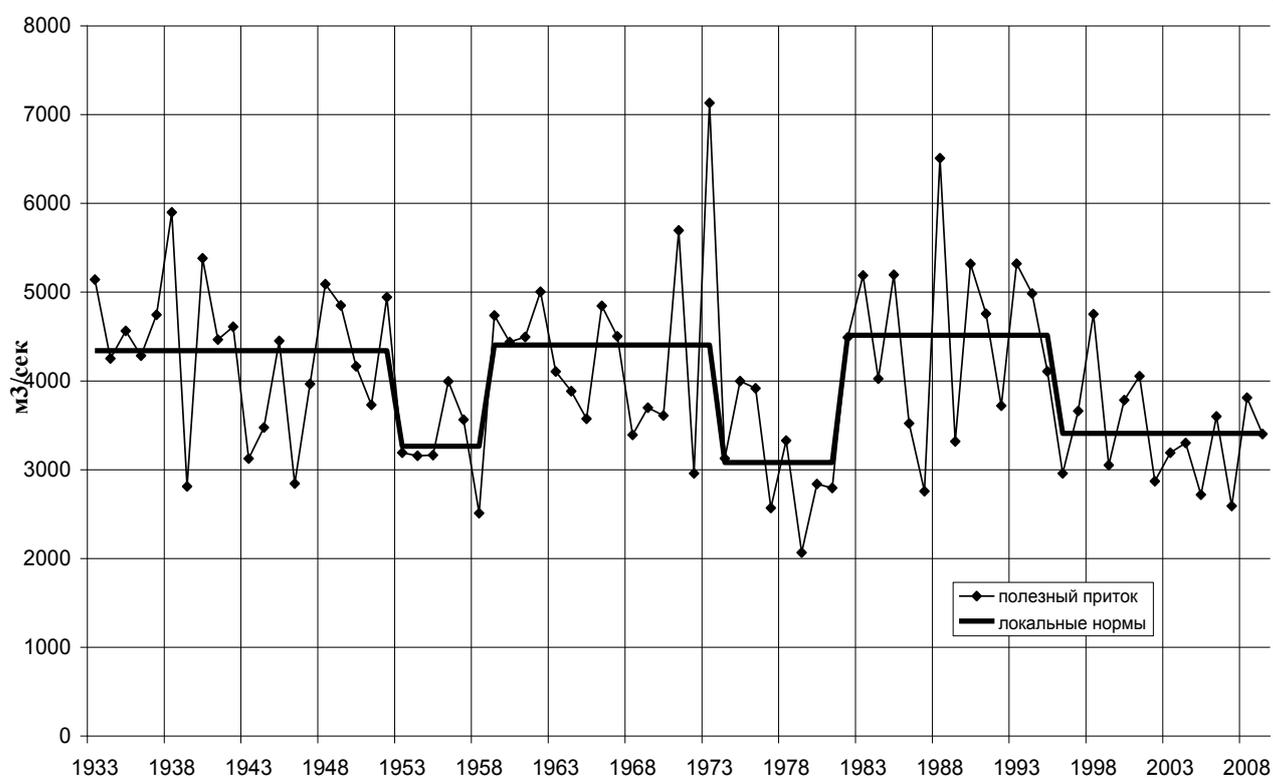


Рисунок 2 - Полезный приток в оз. Байкал. 3-й КВАРТАЛ.

А) – сумма нормированных на СКО аномалий полезного притока;

Б) – полезный приток с локальными нормами.

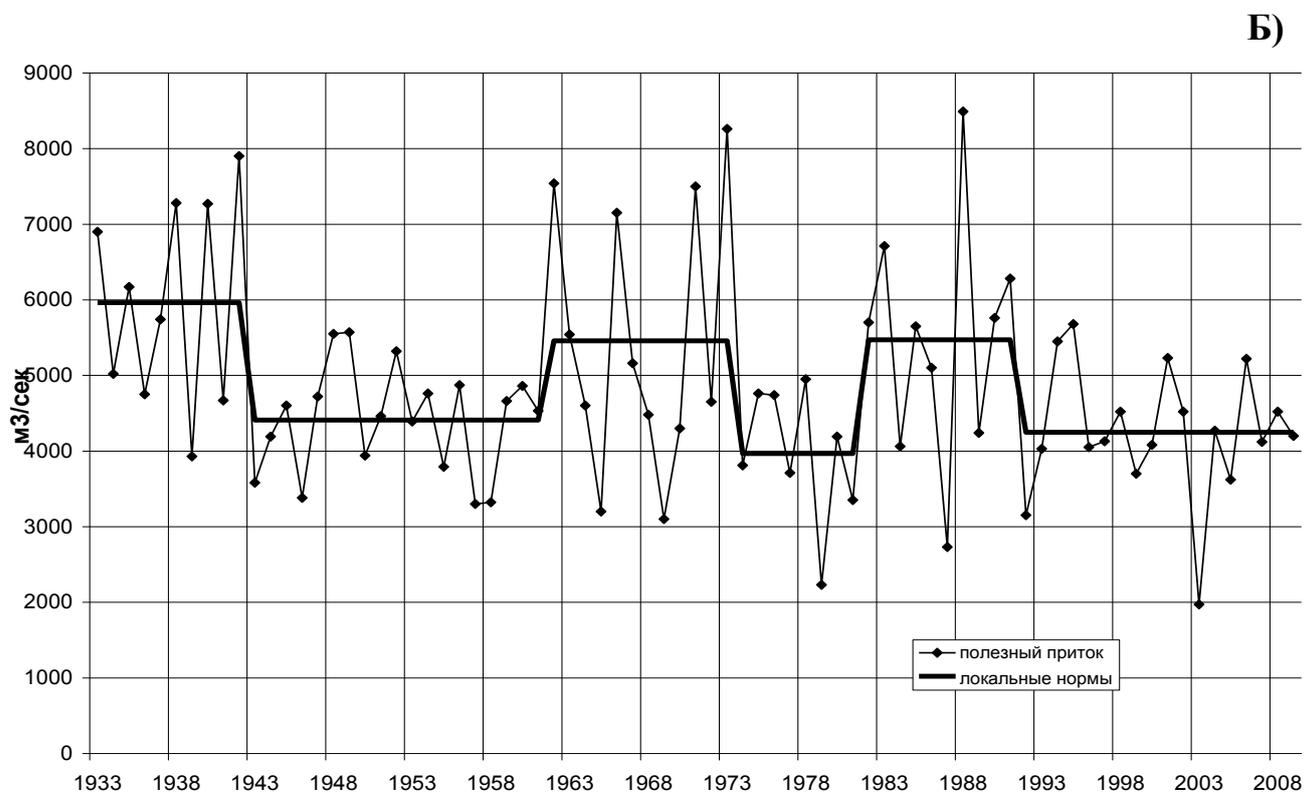
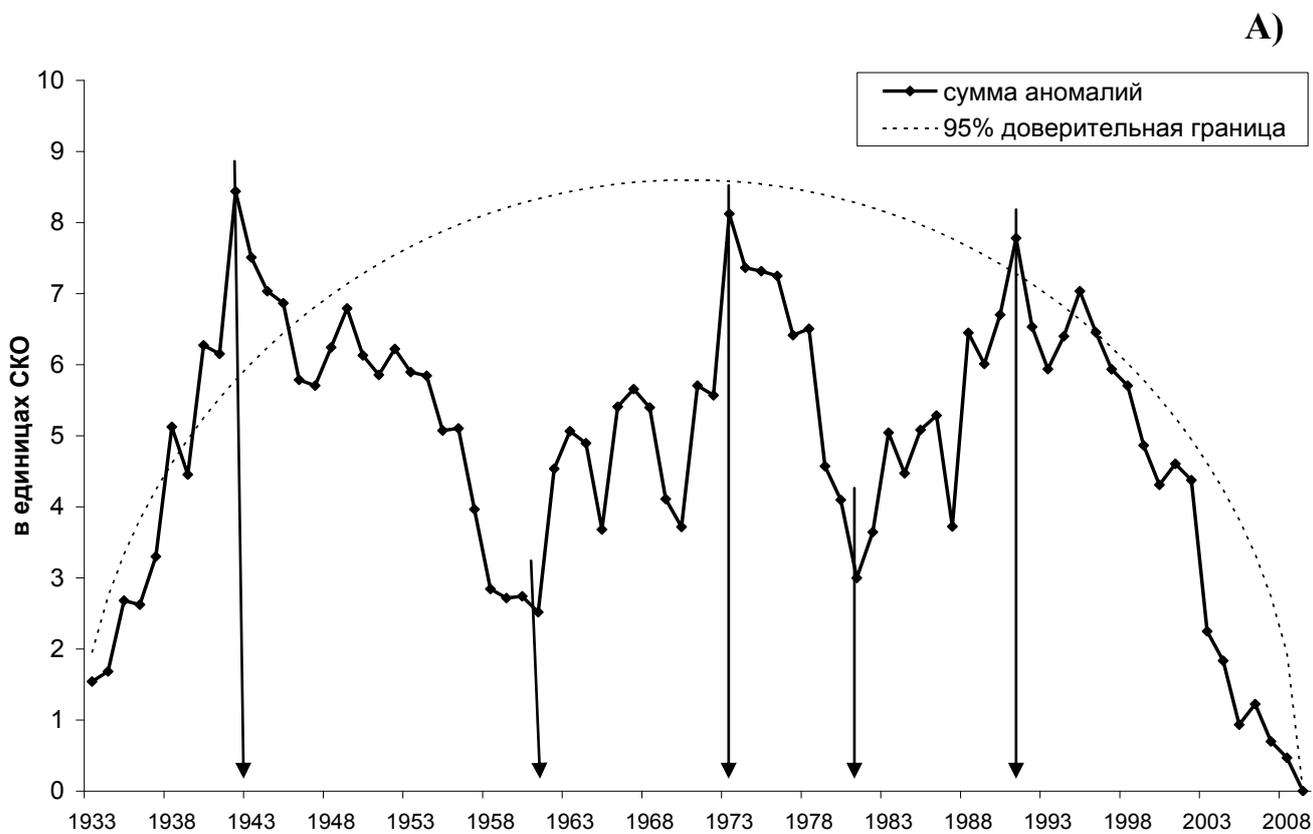


Рисунок 3 - Полезный приток в оз. Байкал. ИЮЛЬ.

А) – сумма нормированных на СКО аномалий полезного притока;

Б) – полезный приток с локальными нормами.

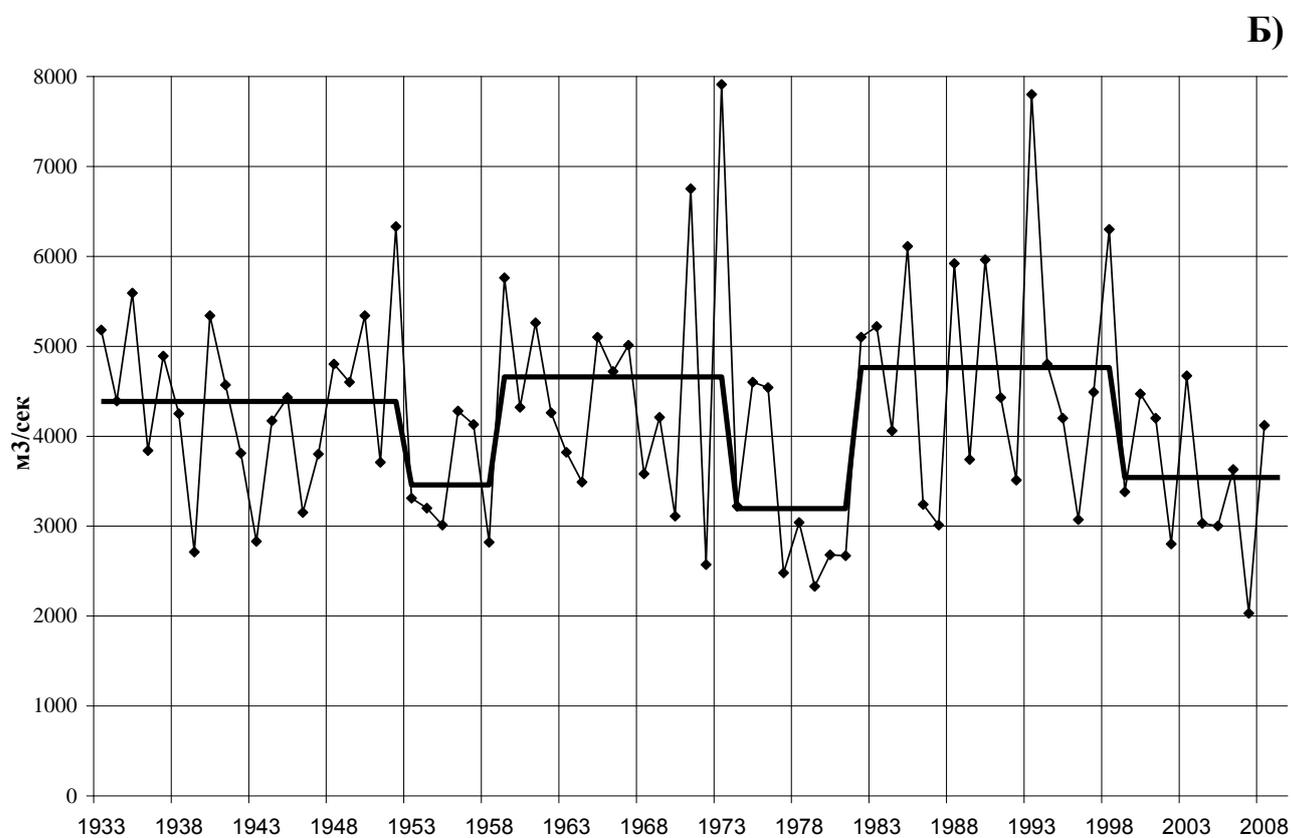
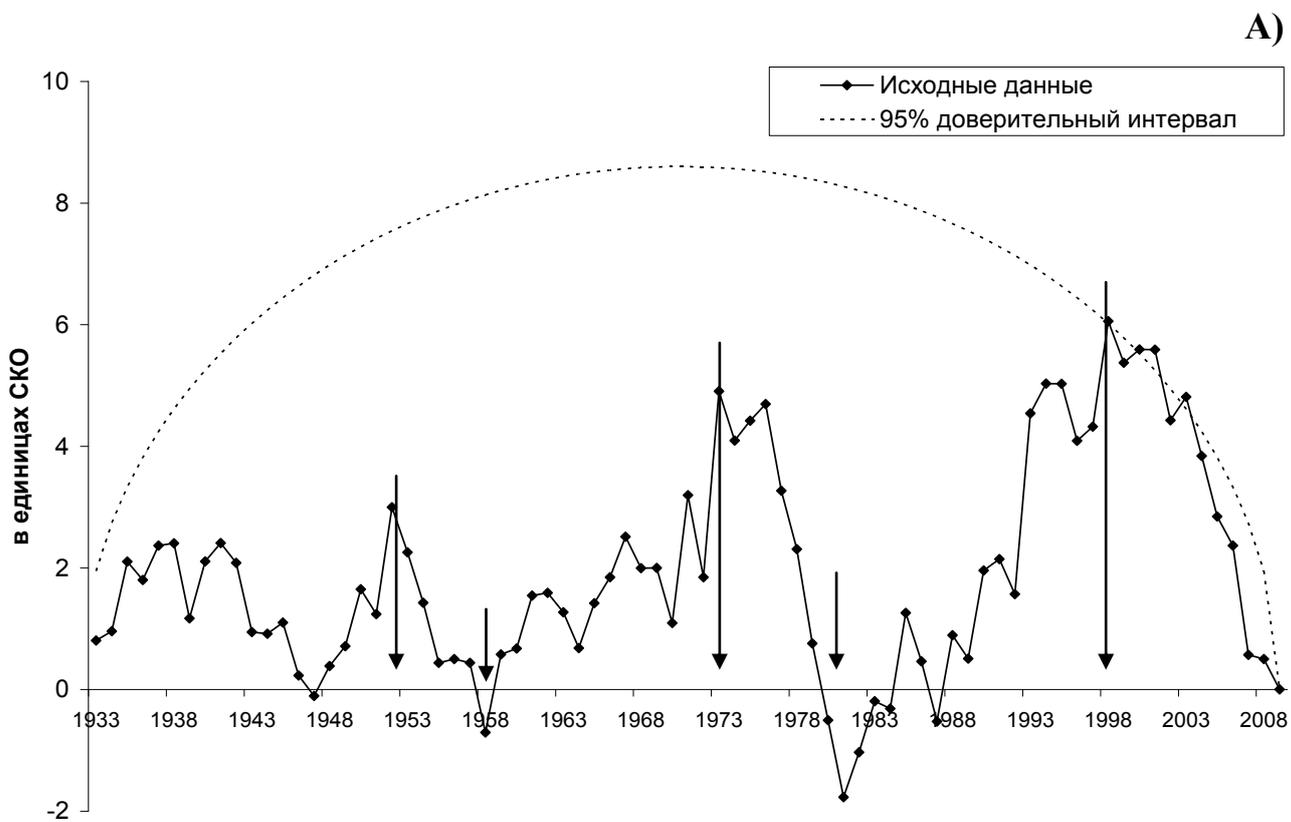
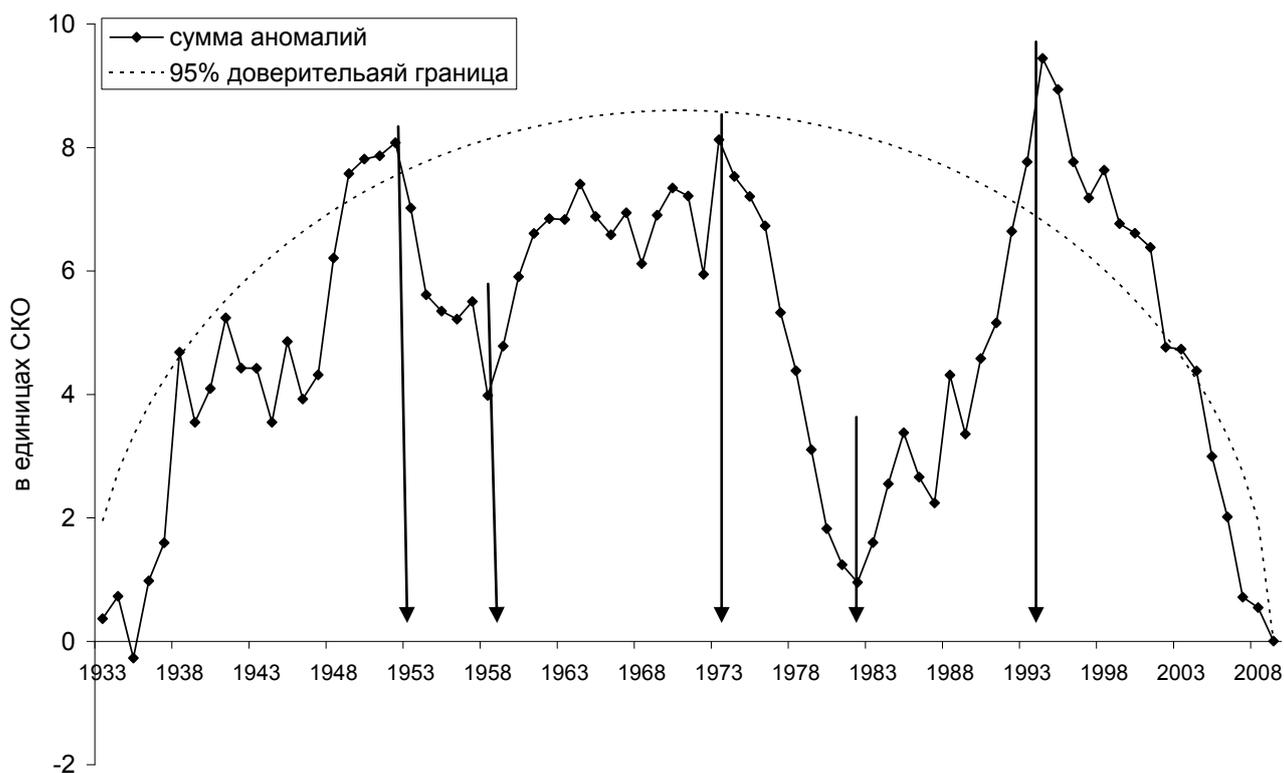


Рисунок 4 - Полезный приток в оз. Байкал. АВГУСТ.

А) – сумма нормированных на СКО аномалий полезного притока;

Б) – полезный приток с локальными нормами.

А)



Б)

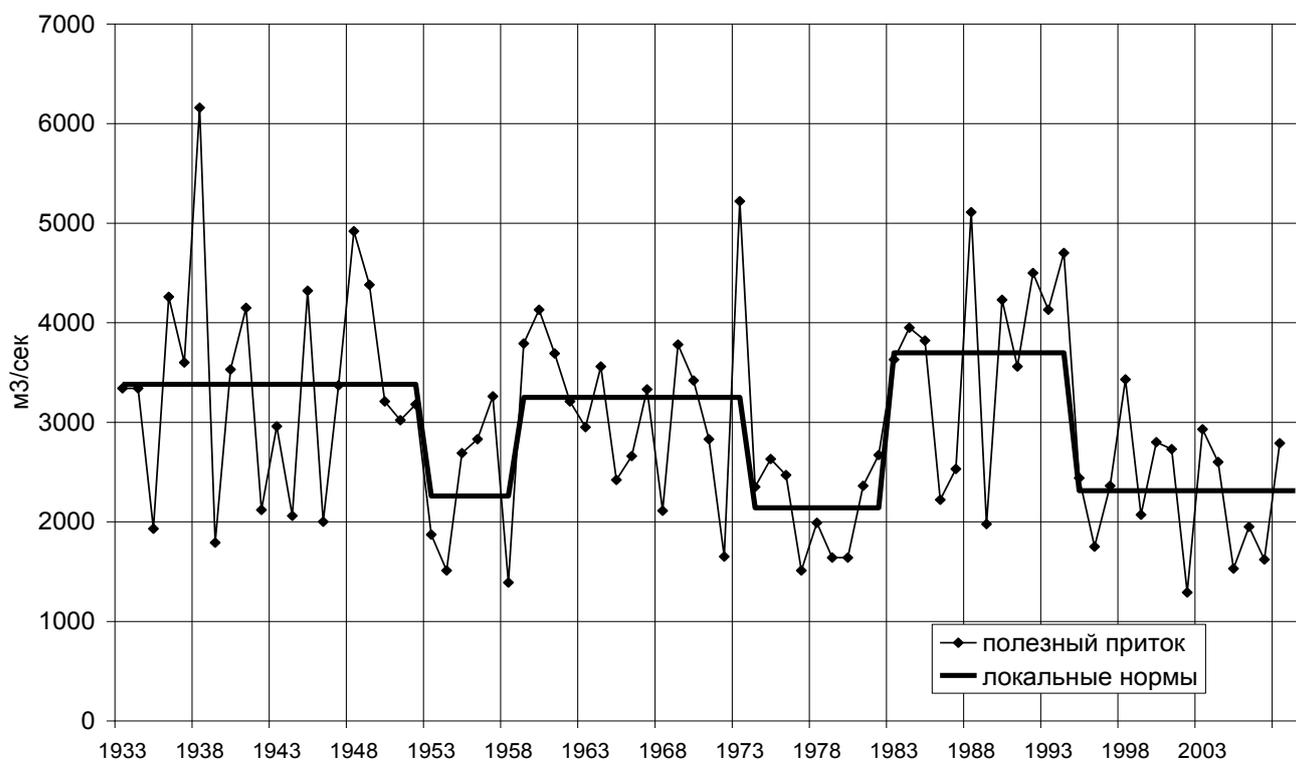


Рисунок 5 - Полезный приток в оз. Байкал. СЕНТЯБРЬ

А) – сумма нормированных на СКО аномалий полезного притока;

Б) – полезный приток с локальными нормами.

## 2.2 Тренды минимального и максимального притоков

Особенностью медленно меняющихся факторов является поведение огибающих максимального и минимального притока и принадлежность притоков разных лет к отрезкам линейных трендов. Продолжение конусов и отрезков трендов на год прогноза указывает на набор наиболее вероятных значений полезного притока в прогнозируемом году.

Из рисунка 6 видно, что существует три больших интервала времени, на которых изменчивость притока имеет разную структуру: 1938-1958, 1959-1981, 1982-2002 года. С 2003 начался новый период. Переход от одной структуры к другой происходит через 1-2 года после максимумов чисел Вольфа в 22-летнем цикле: 1937, 1957, 1979, 2000 года. Рассмотрим более подробно каждый из периодов.

Период 1938-1958 годов структурно представлен двумя конусами, образованными огибающими экстремумов: первый – линиями  $k-l$ , второй – линиями  $k-j$ . Обратим внимание на одну характерную деталь: линия  $k$ , огибающая максимумы первого конуса, при продолжении становится линией, огибающей минимумы второго конуса. Заметим также, что переход от одного конуса к другому совершился сразу после максимума чисел Вольфа в 1947 году.

Период 1959-1980 годов, без учёта двух экстремальных выбросов, характеризуется почти параллельными огибающими линиями  $j-m$ , причём линия  $j$ , также как и линия  $k$ , из огибающей максимумов становится огибающей минимумов. Об экстремальных выбросах будет сказано ниже. Здесь отметим только, что они возникли сразу после максимума чисел Вольфа в 1969 году.

Период с 1982 года рассмотрим подробнее, с учётом внутренних локальных трендов. Не принимая пока во внимание экстремальный выброс 1988 года (который, заметим, случился за год до очередного максимума солнечной активности), укажем три основных конуса: период 1982-1995 гг. – линии  $d-f$ , период 1996-2002 гг. — линии  $b-c$ , период с 2003 года — линии  $c-i$ .

Кроме того, есть два внутренних локальных тренда: линии  $e$  и  $g$ , и огибающая экстремальных выбросов, - линия  $a$ .

Раньше процесс нахождения этих линий производился вручную, теперь он автоматизирован с помощью специальной программы.

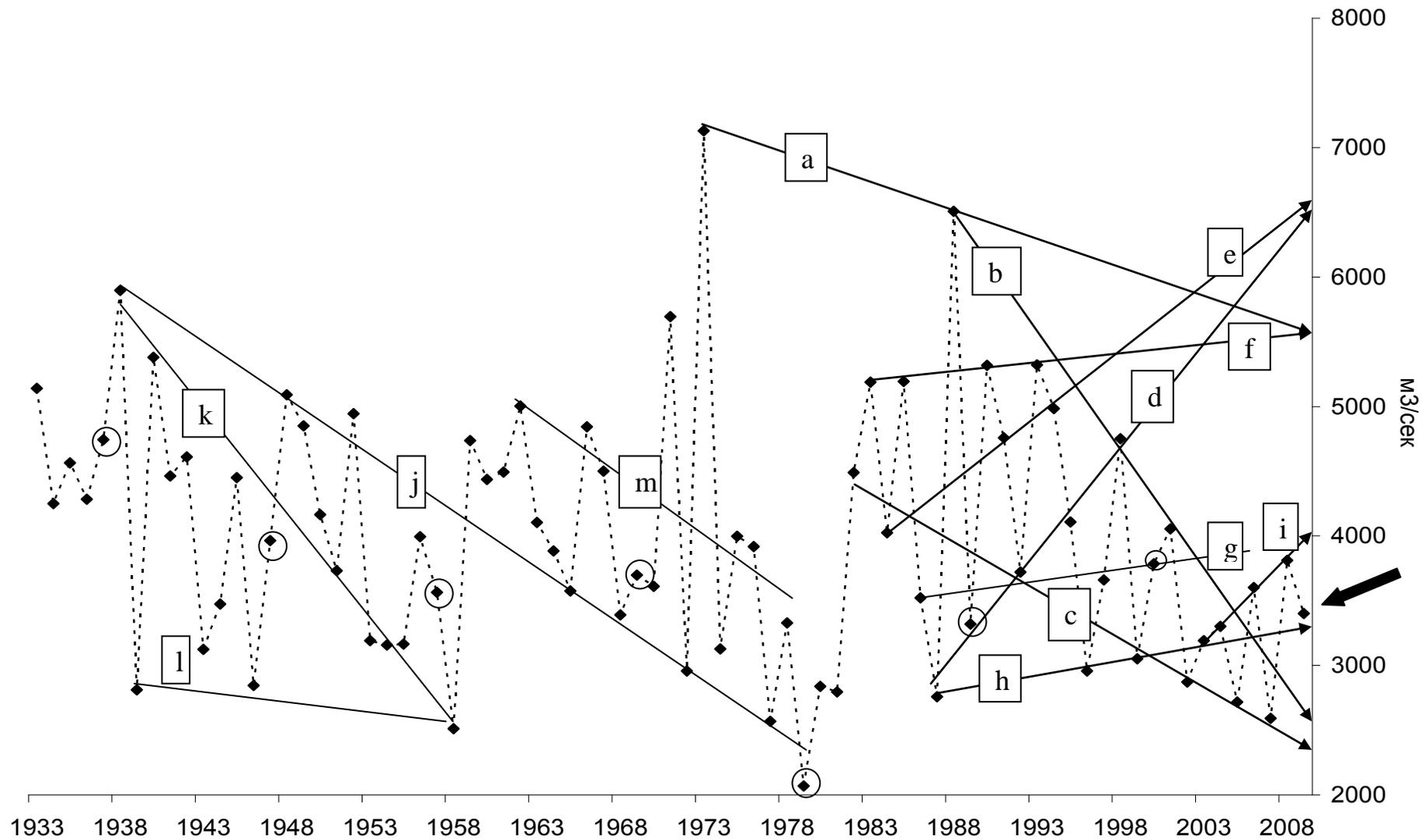


Рисунок 6 - Огибающие экстремумов и внутренние локальные тренды полезного притока III кв. в озеро Байкал (большая стрелка – прогноз; маленькие – варианты прогноза; кружки - года максимумов чисел Вольфа)

## РАЗДЕЛ 3

### Высокочастотные компоненты

#### 3.1 Периодические компоненты

Если из исходного процесса убраны медленно меняющиеся компоненты, то в нем могут оставаться высокочастотные периодические, в частности, гармонические компоненты. Условной границей, разделяющей высокочастотные и низкочастотные компоненты, будем считать период, который не менее 2 раз укладывается во временной интервал  $I=t_N-t_0$ .

Займемся оценкой высокочастотных компонент. Применительно к рассматриваемой задаче – анализ и прогноз притока, основная проблема заключается в малочисленности исходных данных: в нашем распоряжении ряды с несколькими десятками отсчётов в пределах одной сотни. Дело осложняется и нестационарностью анализируемых процессов. В этих условиях применение таких методов, как спектральный анализ и, тем более, вейвлет-анализ, вряд ли приведёт к успеху.

За основу выделения высокочастотной периодической компоненты возьмём селективное линейное преобразование Буй-Балло /10/. Напомним алгоритм преобразования: выбирается пробный период  $T$  (целочисленный); весь интервал  $[t_0, t_N]$  наблюдений делится на отрезки, длиной  $T$ ; вычисляется среднее арифметическое значение по всем отрезкам; усредненная функция, имеющая максимальный размах для какого-то значения пробного периода  $T$ , берётся в качестве оценки периодического компонента. Выбранная функция удаляется из ряда, и процесс повторяется снова, до тех пор, пока выделяемый компонент не будет отличаться от шумового компонента.

Проблема практического применения метода Буй-Балло в том, что пробный период должен быть целым числом. Попытаемся преодолеть это ограничение.

Будем предполагать, что исследуемый процесс  $X(t)$  представим в

следующем виде:

$$X(t) = \sum_{k=1}^m c_k P_k(t) + \varepsilon(t), \quad (4)$$

где  $P_k(t)$  – периодическая функция с периодом  $T_k$ , то есть для любого момента времени  $t$  выполняется равенство

$$P_k(t+T_k)=P_k(t),$$

причем  $T_k$  – минимальное число, удовлетворяющее (2).

$c_k$  - неизвестные константы,

$\varepsilon(t)$  – стационарный случайный процесс с нулевым МО.

Пусть известны отсчеты процесса  $X(t)$  в точках  $t_0, \dots, t_N$ :  $x_k=X(t_k)$ .

Введём безразмерную величину  $\lambda_k$ , которую будем называть *фазой периода T*.

Здесь, как обычно, квадратные скобки указывают на целую часть числа, а фигурные – на дробную часть;  $t_0$  – фиксированный момент времени. Если имеется периодическая компонента с периодом  $T$ , то зависимость  $x(t_k)$  можно представить в виде перестановок:

$$\begin{pmatrix} t_0 & t_1 & t_{N-1} & t_N \\ x_0 & x_1 & x_{N-1} & x_N \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{pmatrix} \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_{N-1} & \lambda_N \\ x_0 & x_1 & x_{N-1} & x_N \end{pmatrix}$$

Переход от времени к фазам периода  $T$  эквивалентен разрезанию всего интервала времени  $(t_0, t_N)$  на отрезки длиной  $T$ , с последующим масштабированием интервала  $(0, T)$  к интервалу  $(0, 1)$ . Упорядочивая последнюю перестановку по возрастанию  $\lambda$ , получим зависимость  $x(\lambda)$ :

$$\begin{pmatrix} \lambda_0 & \lambda_1 & \lambda_{N-1} & \lambda_N \\ x_0 & x_1 & x_{N-1} & x_N \end{pmatrix} \quad (5)$$

Если распределение точек  $\lambda_k$  достаточно равномерно на интервале  $(0, 1)$ , то оценку  $x(\lambda)$ , можно получить сглаживанием скользящей средней. При этом концевые точки также можно вычислить, рассматривая утроенную

последовательность (5), в силу предполагаемой периодичности:



Такой приём позволяет понять, насколько сильно отличается периодическая функция от гармоники и каков её размах (с учётом сглаживания).

Вычисления показывают, что в первом приближении высокочастотные периодические компоненты полезного притока в оз. Байкал можно считать гармониками.

Таким образом, задача сводится к анализу полигармонической функции с неизвестными, но, вообще говоря, некратными периодами.

### 3.2 Гармонические компоненты

Теперь мы вправе предположить, что процесс (4) имеет вид:

$$f(t) = \sum_{k=1}^m A_k \cos(w_k t) + \sum_{k=1}^m B_k \sin(w_k t) + \varepsilon(t) \tag{6}$$

- где  $m$  – количество гармоник;
- $w_k$  - частота  $k$ -ой гармоники;
- $A_k, B_k$  – неизвестные коэффициенты;
- $\varepsilon(t)$  – случайный процесс.

Проблема сводится к нахождению гармонических компонент. Для ее решения будем применять метод Лагранжа-Дейля /10/ со следующим алгоритмом работы.

Будем считать, что нам известны  $N$  значений функции (6) с удаленной низкочастотной компонентой:

$$f(t_k), \quad \text{где } k=1, \dots, N$$

Для нахождения  $3m$  неизвестных коэффициентов в (6) по  $N$  известным

значениям ( $N > 3m$ ) сначала находят  $m$  оценок частот  $\{w_k\}$  из уравнения

$$\cos(mw) - \sum_{k=1}^m \alpha_k \cos(m-k)w - 0.5 \alpha_m = 0. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\alpha_k$  уравнения (7) должны удовлетворять следующей системе линейных уравнений:

$$E_i \equiv \sum_{k=1}^m (f_{i+k-1} + f_{2m+i-k-1}) \alpha_k + f_{m+i-1} \alpha_m - f_{i-1} - f_{2m+i-1} = 0, \quad (i=1, \dots, N-2m).$$

Решение последней системы находится методом наименьших квадратов из системы линейных уравнений относительно  $\{\alpha_k\}$ :

$$\frac{d}{d\alpha} \sum_{k=1}^{N-2m} E_k^2 = 0. \quad (8)$$

Получив из (8) оценки  $\{\alpha_k\}$ , находят  $m$  частот  $\{w_k\}$  из уравнения (7) с  $m$  неизвестными. Зная частоты, определяют  $m$  пар амплитуд  $\{A_k, B_k\}$  из исходного уравнения (6) обычным методом наименьших квадратов. В результате получают оценки всех  $3m$  неизвестных параметров  $\{w_k, A_k, B_k\}$  набора гармонических компонент из уравнения (6).

## РАЗДЕЛ 4

### Подготовка и оценка прогноза

#### 4.1 Алгоритм прогноза

Чтобы составить алгоритм прогноза полезного притока, надо иметь какое-то представление о факторах, его формирующих. Разделим факторы, формирующие аномалию полезного притока на 3 группы:

1. Медленно меняющиеся факторы.
2. Быстро меняющиеся факторы.
3. Факторы, формирующие экстремальный приток.

Медленно меняющиеся факторы задают, так сказать, общий фон, основу прогноза. Так, закономерное чередование локальных норм, рассмотренных в разделе 2.1, подсказывает нам, что вскоре будет совершён переход полезного притока 3-го квартала от средних значений 3000-3300 м<sup>3</sup>/сек к средним значениям 4300-4500 м<sup>3</sup>/сек. Понятно, что этот переход увеличивает вероятность экстремальных выбросов. При подготовке прогноза надо помнить об этом обстоятельстве.

Второй особенностью низкочастотной компоненты является поведение огибающих экстремальных значений притока и внутренних локальных трендов. Рассмотрим эту схему на примере прогноза 2009 года (рис.6). Каждая точка рассматриваемого периода принадлежит какой-то линии и, что очень важно, соседние точки принадлежат разным линиям. Всю последовательность точек за 1982-2009 гг. можно представить в виде последовательности линий, которым они принадлежат:

*c-f-e-f-g-d-f-e-d-f-e-d-h-g-b-c-g-b-c-h-i-c-i-c-i-h-?*

Продолжение линий на прогнозируемый год указывает на наиболее вероятные значения полезного притока 3-го квартала. Так, при прогнозе 2009 года первичный набор вариантов прогноза задавался следующим образом:

линии *c, b* (2300-2500 м<sup>3</sup>/сек); линия *h* (3300 м<sup>3</sup>/сек); линии *g, i* (4000 м<sup>3</sup>/сек); линии *a, f* (5600 м<sup>3</sup>/сек); линии *d, e* (6600 м<sup>3</sup>/сек). Аналогичным образом рассчитываются наиболее вероятные значения притока для июля, августа и сентября.

Следующий этап подготовки прогноза заключается в согласовании месячных вариантов прогноза с квартальным. Согласование заключается в том, что различные сценарии ожидаемого полезного притока по месяцам должны соответствовать, в пределах заданной точности, притоку за квартал. При этом, часть вероятных притоков по кварталу может быть исключена. Например, если среднее из максимально ожидаемых месячных притоков окажется заметно ниже максимально ожидаемого притока в квартале, то такой вариант, естественно, исключается из рассмотрения.

Приведём эмпирические правила, которые были выработаны в процессе подготовки вероятных сценариев прогноза:

- 1). Как правило, огибающая линия, ограничивающая максимумы, переходит в огибающую линию, ограничивающую минимумы, и наоборот.
- 2). Если огибающие экстремумов сходятся, то вблизи точки схождения (вершины конуса) следует ожидать значительный бросок полезного притока в ту или другую сторону.
- 3). Экстремальные выбросы полезного притока соседствуют с довольно низкими притоками.

Если после процедуры согласования остаётся один вариант, то он и принимается за прогноз. Обычно бывает 2-5 вариантов, довольно часто 2-3 варианта. Так, согласованными вариантами 2009 года были:

4000 м<sup>3</sup>/сек — линия *g*,

3300 м<sup>3</sup>/сек — линия *h*,

2400 м<sup>3</sup>/сек — линии *c, b*.

Какой из согласованных вариантов выбрать в качестве прогноза, это и является задачей следующего этапа работы, который решается с помощью анализа быстрых переменных.

Быстроменяющиеся факторы в применении к полезному притоку – это гармоника с периодами от 2 и где-то до 7-10 лет. Этим гармоник, за каждой из которых стоит какой-то конкретный физический фактор, может быть достаточно много: от единиц до десятков. Надо иметь в виду, что это не гармоники ряда Фурье с кратными периодами, а именно природные циклы.

Будем исходить из того (а у нас другого выбора-то и нет!), что на небольших интервалах времени (15-20-30 лет) основной вклад в изменчивость притока вносят 2-3 гармоники, возможно, разные для различных интервалов времени. Для нахождения параметров этих гармоник (период, фаза, амплитуда) воспользуемся методом Лагранжа-Дейля, который изложен в п. 3.2. Но не на всем интервале наблюдений, как это принято в классической схеме, а на интервале, у которого правая граница соответствует году перед прогнозом, а левая граница интервала не фиксируется и подбирается исходя из условия минимизации остаточной дисперсии.

Чтобы убрать, если потребуется, влияние медленно меняющихся компонент, перейдем к разностному ряду полезного притока, то есть вместо ряда  $x_k$  будем рассматривать ряд  $y_k = x_k - x_{k-1}$ , и по нему оценивать параметры гармоник. Фазы гармоник в этом случае изменятся, но нам достаточно будет знать итоговый прогноз по набору гармоник: насколько и в какую сторону отклонится полезный приток относительно притока последнего перед прогнозом года.

Так, при прогнозе полезного притока 2009 года, 2 гармоники по разностному ряду 3-го квартала с левой границей, равной 1989 году, дали оценку  $-300 \text{ м}^3/\text{сек}$  от уровня 2008 года, то есть в абсолютных значениях это составило  $3500 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Ближайший согласованный вариант прогноза был  $3300 \text{ м}^3/\text{сек}$ , которой окончательно и был принят за прогноз 3-го квартала 2009 года.

И, наконец, факторы экстремального притока. Какую модель применить для их анализа: случайную или детерминированную? Если случайную модель, то прогноз экстремальных отклонений невозможен.

Будем считать, что экстремальные выбросы притока образуются при

совпадении максимумов (минимумов) нескольких быстроменяющихся гармоник. В этом случае есть надежда, что первые 2-3 гармоники покажут если не экстремальный, то значительный выброс. Кстати говоря, точная оценка экстремально большого полезного притока, равная 6000 м<sup>3</sup>/сек в августе 1998 года, была получена именно таким способом. Полное решение проблемы экстремальных притоков будет возможно лишь при понимании физических факторов, стоящих за основными гармониками. Но это в перспективе.

#### 4.2 Качество прогноза

Под качеством прогнозов будем понимать заблаговременность, детальность и точность.

По заблаговременности метод прогноза полезного притока в оз. Байкал на 3-й квартал составляет полгода, то есть может быть выдан в ноябре-декабре, после получения оперативных данных по фактическому полезному притоку за июль-сентябрь. Но обычно прогноз готовится к 20 июня, то есть с нулевой заблаговременностью.

Детализация прогноза по кварталу – месячная, но возможен переход и к декадной детализации.

Точность прогнозирования будем оценивать по принятому в гидрологии критерию: прогноз считается оправдавшимся, если

$$|P - F| < 0,67\sigma,$$

где  $P$ ,  $F$  – прогнозное и фактическое значение элемента;  $\sigma$  – СКО элемента.

Величина  $0,67\sigma$ , принятая для расчёта точности полезного притока по оз.

Байкал, есть:

Июль	920 м <sup>3</sup> /сек
Август	800 м <sup>3</sup> /сек
Сентябрь	710 м <sup>3</sup> /сек
3-й кв.	680 м <sup>3</sup> /сек

В таблице 3 представлены результаты оправдываемости прогнозов полезного притока в оз. Байкал на 3-й квартал по изложенному методу. Причём последние 2 года прогнозы выдавались по усовершенствованной схеме. Из таблицы видно, что наиболее слабым звеном в прогнозировании 2005-2007 гг. был прогноз притока в сентябре. В 2008-2009 гг. прогноз по сентябрю улучшился и, кроме того, стала меньше разница между прогнозом и фактом, как по кварталу, так и по месяцам.

Таблица 3 - Результаты оправдываемость прогнозов полезного притока в оз. Байкал по методу Завалишина

Год	Период	Прогноз (м <sup>3</sup> /сек)	Факт (м <sup>3</sup> /сек)	Разность (м <sup>3</sup> /сек)	Оправд.
2005	Июль	4500	3620	880	да
	Август	3700	3000	700	да
	Сентябрь	2300	1530	770	нет
	3 кв.	3300	2717	583	да
2006	Июль	4800	5220	-420	да
	Август	3700	3630	70	да
	Сентябрь	2900	1950	950	нет
	3 кв.	3800	3600	200	да
2007	Июль	3900	4120	-220	да
	Август	4900	2030	2870	нет
	Сентябрь	3200	1620	1580	нет
	3 кв.	4000	2590	1410	нет
2008	Июль	4900	4520	380	да
	Август	4000	4120	-120	да
	Сентябрь	2200	2790	-590	да
	3 кв.	3700	3810	-110	да
2009	Июль	3700	4200	-500	да
	Август	3400	3600	-200	да
	Сентябрь	2800	2400	400	да
	3 кв.	3300	3400	-100	да

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан упрощённый метод выделения локальных норм в рядах гидрометеозаписей и применён к рядам полезного притока в оз. Байкал месячного и квартального разрешения. Выделены две локальные нормы в полезном притоке 3-го квартала: 3000-3300 м<sup>3</sup>/сек и 4300-4500 м<sup>3</sup>/сек. Есть основание считать, что вскоре совершится переход к повышенной водности на период около 20 лет.

Методика Бюй-Балло выделения периодических компонент расширена на периоды, некратные шагу по времени, и применена к анализу формы периодических компонент в рядах полезного притока месячного и квартального разрешения. Установлено, что в первом приближении эти ряды можно считать гармоническими.

Алгоритмизирован процесс подготовки прогноза полезного притока по 3-му кварталу. Алгоритм прогноза заключается в расчёте вариантов прогноза по медленно и быстро меняющимся компонентам для всех месяцев квартала и квартала в целом. После этого строятся различные сценарии притока по месяцам, при соблюдении условия равенства квартального и среднего за июль-сентябрь полезного притока. Из полученного множества сценариев выбирается наиболее вероятный сценарий при помощи метода Лагранжа-Дейля с 2-3 гармониками и свободной левой границей интервала.

При заказе темы первоначально планировалось выполнить весь объём работ за три года. Однако, Заказчик сократил этот период на 1 год. Поэтому автоматизацию расчёта прогнозов пришлось сделать по упрощённой схеме: в рамках технологии «Кассандра-Сибирь» /11/ прогноз считается по разностному ряду полезного притока с учётом только быстроменяющейся компоненты.

Перспектива исследований видится в понимании физических причин, которые отражаются в виде гармоник в полезном притоке в озеро Байкал.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атлас Забайкалья (Бурятская ССР и Читинская область). Москва-Иркутск: ГУГиК СМ СССР, 1967. 176 с.
2. Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс озера Байкал. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 238 с.
3. Дружинин И.П., Хамьянова Н.В. Солнечная активность и переломы хода природных процессов на Земле. М: Наука, 1969. 224 с.
4. Дружинин И.П. Изменчивость гидрометеозаэментов. Новосибирск: Наука, 1990. 257 с.
5. Yamamoto R., et al. Climatic jump. A hypothesis in climatic diagnosis // J. Met. Soc. Jpn. 1985. Vol. 63. P. 1157–1180.
6. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М: Наука, 1983. 200 с.
7. Баасвиль М., Вилкси А., Банвентист А. И. др. Обнаружение изменения свойств временных рядов. М: Мир, 1991. 252 с.
8. Понько В.А. Введение в систему «Экопрогноз». Методология прогнозирования аномалий экосферы // Институт устойчивого развития. Москва, 2000. 136 с.
9. Завалишин Н.Н. О норме метеозаэментов, климате и методах их оценки // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 103. С. 11-17.
10. Серебрянников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
11. « Кассандра-Сибирь». Методические указания по технологии подготовки долгосрочных гидрометеорологических прогнозов для Западной и Восточной Сибири. М: Росгидромет, 2010. 55 с.