ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2020, том 47, № 3, с. 243–250

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.166:519.24

ПРИЛОЖЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ БОЛЬШИХ ПАВОДКОВ НА НИЖНЕМ АМУРЕ

А. Н. Махинов[a], В. Ю. Косыгин[b, *], М. Х. Ахтямов[c], В. Д. Катин[c]

[a]*Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, 680000 Россия*

[b]*Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000 Россия*

[c]*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, 680021 Россия*

**e-mail: kosyginv@inbox.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.
После доработки 18.11.2019 г.
Принята к публикации 24.12.2019 г.

Для р. Амур характерны регулярно повторяющиеся катастрофические наводнения, приносящие значительный ущерб населению и существенно осложняющие хозяйственную деятельность. На основе статистического анализа максимальных годовых уровней воды в р. Амур по гидрологическому посту Хабаровск за период наблюдений с 1896 по 2016 г. получены аналитические выражения для функций распределения вероятностей генеральных совокупностей уровней за весь период наблюдений, а также за периоды первоначального слабого (1896–1960 гг.) и современного интенсивного (1961–2016 гг.) хозяйственного освоения территории Приамурья. Установлено, что в современный период риск формирования высоких паводков уменьшился примерно в два раза, а средние интервалы их повторяемости возросли в два раза по сравнению с предшествующим периодом. Показано, что интенсивная хозяйственная деятельность в бассейне Амура в последние десятилетия привела к понижению наиболее вероятных уровней воды на 0.5 м. В целом, опасность высоких паводков в долине нижнего течения р. Амур уменьшилась, однако на ее фоне возросла амплитуда высотных отметок уровней воды и ее экстремальные значения для отдельных лет, что проявилось во время катастрофического наводнения 2013 г. Согласно проведенным расчетам, средний период повторяемости этого выдающегося паводка составляет 144 года, а вероятность его возникновения – 0.7%. Полученные данные могут быть использованы при разработке комплекса берегозащитных и русло-формирующих мероприятий в нижнем течении р. Амур, при оценке антропогенного влияния на изменение водного режима и на водные и пойменные экосистемы реки.

Ключевые слова: Амур, водный режим, наводнения, уровни воды, распределение максимальных значений, выборка.

DOI: 10.31857/S0321059620030104

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что водный режим р. Амур и ее крупных притоков обладает рядом специфических особенностей, среди которых основные – часто повторяющиеся наводнения различной степени интенсивности. Особую опасность представляют высокие летне-осенние паводки, имеющие дождевой генезис [5, 10]. Вызванные ими катастрофические наводнения приносят значительный ущерб населению в долинах рек. Большая высота подъема воды и продолжительность наводнений осложняют условия жизни и деятельности людей. Наиболее значительным из них было наводнение 2013 г. [9, 14].

Причина наводнения 2013 г. на Амуре – уникальное непредсказуемое сочетание природных факторов, одновременно проявившихся в бассейне реки в конце лета. Основными факторами формирования крупнейшего за всю историю инструментальных наблюдений паводка были высокая зимняя межень (на 1.5 м выше средних значений), интенсивное выпадение осадков в период июль–август и последовательное одновременное с пиком паводка на Амуре поступление вод из его притоков. Однако ведущую роль в формировании паводка сыграли особо обильные атмосферные осадки, выпавшие в большом количестве над всей территорией Амурского бассейна [16].

Наводнение принесло значительный ущерб населению и экономике Дальневосточного региона. Были частично затоплены территории городов Благовещенска, Хабаровска, Комсомольска-на-Амуре и многих других населенных пунктов. Несколько тысяч домов не подлежат восстановлению из-за повреждений. Десятки тысяч людей были эвакуированы. В российской части бассейна Амура прямой экономический ущерб оценен в 12 млрд руб., а общие потери от паводка составили не менее 30 млрд руб. [2].

С целью минимизации негативных последствий крупных наводнений представляется целесообразным оценить влияние экстремальных характеристик стока на гидрологический режим р. Амур. Оценки расчетных характеристик уровенного режима этой реки необходимы для выполнения гидрологических расчетов, гидродинамического моделирования и прогнозирования для различных ее участков. Они могут быть использованы при разработке различных схем регулирования стока (в том числе и противопаводочного) в бассейне Амура и его крупных притоков с учетом выявленных и прогнозируемых изменений гидрологического и гидроморфологического режимов.

В этой связи представляется весьма важным провести анализ вероятности и повторяемости экстремально высоких уровней р. Амур в нижнем его течении, а также оценить влияние на них результатов хозяйственной деятельности в пределах Амурского бассейна. С этой целью рассматриваются данные по гидрологическому посту Хабаровск. Результаты анализа позволят учесть полученные данные при разработке комплекса берегозащитных и руслоформирующих мероприятий на прибрежной территории.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 1 представлены максимальные ежегодные отметки уровня (м) р. Амур в створе у Хабаровска за весь период инструментальных наблюдений – с 1896 по 2016 г., где за нулевую отметку уровня воды принята отметка, расположенная выше нуля Балтийской системы высот (БСВ) на 31.15 м.

Отметки уровня из табл. 1 представляют собой выборку $n = 121$ (n – число максимальных годовых отметок уровня, зарегистрированных за весь период инструментальных наблюдений) из генеральной совокупности максимальных отметок уровней, включая и период, когда измерения не проводились – до 1896 г.

Так как данная выборка представлена максимальными уровнями, то и соответствующая ей генеральная совокупность этих величин должна иметь распределение максимальных значений. Один из главных результатов асимтотической теории максимальных значений заключается в том, что любое распределение максимальных значений должно принадлежать к одному из трех типов распределений [1, 3, 13, 15]:

$$\text{Тип I} \quad F(y) = \exp(-\exp(-y)) \quad -\infty < y < \infty,$$

$$\text{Тип II:} \quad F(y) = \begin{cases} 0, & y \le 0 \\ \exp(-y^{-k}), \text{ при } k > 0, & y > 0, \end{cases}$$

$$\text{Тип III:} \quad F(y) = \begin{cases} \exp(-(-y)^{k}), \text{ при } k > 0, & y \le 0, \\ 1, & y > 0, \end{cases}$$

здесь $y = \dfrac{x - \mu}{\lambda}$ для типов распределений I и II и $y = \dfrac{\mu - x}{\lambda}$ для распределения типа III, $\mu > 0$, $\lambda > 0$, $k > 0$ – параметры этих распределений.

Попытаемся выяснить, к какому из трех типов распределений относится распределение вероятностей генеральной совокупности максимальных уровней, из которой сделана выборка (табл. 1).

Известно, что первые задачи, связанные с распределениями максимальных значений, возникли именно в связи с анализом паводков на реках. Так, Э. Гумбелем [8], исследовавшим распределения паводков на реках Миссисипи, Колорадо, Нил и других, показано, что все эти распределения относятся к типу I.

Предположим, что и распределение максимальных уровней Амура также относится к типу I. и проверим правильность этого предположения.

Для распределения максимальных уровней типа I формула, описывающая функцию распределения вероятностей $F(x)$, имеет следующий вид:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(x - \mu)}{\lambda}\right)\right), \tag{1}$$

параметр распределения μ – мода, λ – параметр масштаба.

Оценим параметры распределения μ и λ. Для этого по данным выборки сначала вычислим выборочное среднее $\overline{z}$ и выборочное среднее квадратичное отклонение S:

$$\overline{z} = \frac{\sum_{j=1}^{n} z_j}{n} = 4.31, \tag{2}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (\overline{z} - z_j)^2}{n - 1}} = 1.18, \tag{3}$$

z_j – член выборки с порядковым номером j, $n = 121$ – объем выборки.

Таблица 1. Максимальные годовые уровни паводков за весь период наблюдений в створе у Хабаровска (j — порядковый номер члена выборки, z_j — член выборки с порядковым номером j, значения z_j даны в метрах)

j	Год	z_j	j	Год	z_j	j	Год	z_j	j	Год	z_j
1	1896	5.76	32	1927	4.20	63	1958	5.30	94	1989	4.97
2	1897	6.42	33	1928	6.00	64	1959	6.30	95	1990	4.46
3	1898	4.47	34	1929	5.90	65	1960	5.90	96	1991	5.64
4	1899	3.56	35	1930	3.80	66	1961	5.70	97	1992	3.30
5	1900	4.37	36	1931	4.50	67	1962	4.80	98	1993	4.19
6	1901	5.50	37	1932	6.20	68	1963	5.20	99	1994	4.08
7	1902	6.30	38	1933	3.80	69	1964	4.20	100	1995	3.37
8	1903	3.60	39	1934	4.10	70	1965	4.80	101	1996	4.14
9	1904	4.50	40	1935	4.50	71	1966	4.30	102	1997	3.66
10	1905	3.20	41	1936	5.00	72	1967	3.59	103	1998	5.23
11	1906	4.50	42	1937	4.60	73	1968	2.70	104	1999	2.94
12	1907	5.10	43	1938	6.00	74	1969	4.30	105	2000	3.22
13	1908	4.70	44	1939	4.20	75	1970	3.80	106	2001	2.61
14	1909	3.80	45	1940	4.10	76	1971	4.82	107	2002	2.11
15	1910	5.50	46	1941	4.90	77	1972	5.70	108	2003	3.44
16	1911	5.30	47	1942	4.20	78	1973	4.72	109	2004	4.33
17	1912	3.90	48	1943	4.30	79	1974	4.08	110	2005	3.78
18	1913	3.30	49	1944	5.00	80	1975	3.01	111	2006	3.43
19	1914	3.80	50	1945	4.50	81	1976	2.69	112	2007	2.25
20	1915	5.80	51	1946	3.80	82	1977	3.82	113	2008	0.65
21	1916	5.40	52	1947	4.80	83	1978	3.30	114	2009	4.94
22	1917	5.10	53	1948	4.70	84	1979	2.21	115	2010	4.32
23	1918	3.50	54	1949	5.40	85	1980	3.28	116	2011	3.11
24	1919	3.70	55	1950	3.30	86	1981	5.46	117	2012	3.31
25	1920	4.40	56	1951	6.40	87	1982	3.71	118	2013	8.08
26	1921	2.00	57	1952	3.40	88	1983	3.84	119	2014	3.38
27	1922	3.90	58	1953	6.10	89	1984	6.20	120	2015	2.55
28	1923	3.80	59	1954	2.13	90	1985	5.50	121	2016	3.76
29	1924	3.60	60	1955	5.10	91	1986	3.49			
30	1925	2.80	61	1956	6.00	92	1987	4.26			
31	1926	2.20	62	1957	6.10	93	1988	4.35			

Тогда статистические оценки параметров распределения μ и λ, полученные методом моментов, будут следующие [4, 7]:

$$\mu = \overline{z} - 0.4501, \quad S = 3.78, \quad \lambda = 0.7297S, \tag{4}$$

параметры $\overline{z}$ и S даны формулами (2), (3).

Подставив полученные статистические оценки (4) для параметров μ и λ в формулу (1) для $F(x)$, в итоге получим предполагаемый закон распределения вероятностей $F_0(x)$ генеральной совокупности максимальных уровней воды в Амуре в створе у Хабаровска:

$$F_0(x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(x-3.78)}{0.92}\right)\right). \tag{5}$$

Формула (5) для $F_0(x)$ получена на основе анализа данных выборки за весь период инструментальных наблюдений уровней с 1896 по 2016 г. (табл. 1).

Для дальнейшего статистического анализа приведенных в табл. 1 экспериментальных данных выборки расположим их в порядке возрастания. В результате получим эту же выборку в виде вариационного ряда уровней Амура, представленного в табл. 2: вариант x_i ($i = 1, 2, \ldots, n$; i — порядковый номер члена вариационного ряда; x_i — член вариационного ряда с порядковым номером i).

Таблица 2. Вариационный ряд значений максимальных уровней Амура в створе у Хабаровска (i – порядковый номер члена вариационного ряда, x_i – член вариационного ряда с порядковым номером i, значения x_i даны в метрах)

i	Варианта x_i	i	Варианта x_i	i	Варианта x_i	i	Варианта x_i	i	Варианта x_i
1	0.65	26	3.40	51	4.08	76	4.50	101	5.50
2	2.00	27	3.43	52	4.08	77	4.60	102	5.50
3	2.11	28	3.44	53	4.10	78	4.70	103	5.64
4	2.13	29	3.49	54	4.10	79	4.70	104	5.70
5	2.20	30	3.50	55	4.14	80	4.72	105	5.70
6	2.21	31	3.56	56	4.19	81	4.80	106	5.76
7	2.25	32	3.59	57	4.20	82	4.80	107	5.80
8	2.55	33	3.60	58	4.20	83	4.80	108	5.90
9	2.61	34	3.60	59	4.20	84	4.82	109	5.90
10	2.69	35	3.66	60	4.20	85	4.90	110	6.00
11	2.70	36	3.70	61	4.26	86	4.94	111	6.00
12	2.80	37	3.71	62	4.30	87	4.97	112	6.00
13	2.94	38	3.76	63	4.30	88	5.00	113	6.10
14	3.01	39	3.78	64	4.30	89	5.00	114	6.10
15	3.11	40	3.80	65	4.32	90	5.10	115	6.20
16	3.20	41	3.80	66	4.33	91	5.10	116	6.20
17	3.22	42	3.80	67	4.35	92	5.10	117	6.30
18	3.28	43	3.80	68	4.37	93	520	118	6.30
19	3.30	44	3.80	69	4.40	94	5.23	119	6.40
20	3.30	45	3.80	70	4.46	95	5.30	120	6.42
21	3.30	46	3.80	71	4.47	96	5.30	121	8.08
22	3.30	47	3.82	72	4.50	97	5.40		
23	3.31	48	3.84	73	4.50	98	5.40		
24	3.37	49	3.90	74	4.50	99	5.46		
25	3.38	50	3.90	75	4.50	100	5.50		

В качестве основной статистической гипотезы (предположения) выдвинем гипотезу H о том, что генеральная совокупность максимальных отметок уровня воды в Амуре в створе у Хабаровска имеет распределение вероятностей $F_0(x)$, описываемое формулой (5). Для проверки справедливости этой гипотезы выберем критерий согласия χ^2 К. Пирсона [6], который оценивает меру близости частот эмпирических и теоретических (вычисленных в предположении о том, что распределение максимальных отметок уровня в генеральной совокупности описывается формулой (5)). Статистика этого критерия

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

имеет χ^2-распределение при $n \to \infty$ со степенями свободы $k = m - r - 1$ (m – число интервалов разбиения вариационного ряда; r – число параметров теоретического распределения $F_0(x)$; p_i – теоретические вероятности, определяемые по формуле $p_i = F_0(x_{i+1}) - F_0(x_i)$, x_i и x_{i+1} – соответственно левая и правая границы i-го интервала; n_i – число вариант x_i, попадающих в i-й интервал разбиения; n – объем выборки). Так как односторонний критерий более уверенно отвергает гипотезу H, чем двусторонний, создадим правостороннюю критическую область, определяемую следующим выражением:

$$P[\chi^2 > \chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k)] = \alpha, \tag{6}$$

где α – уровень значимости, $\chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k)$ – критическое значение, определяемое по таблицам распределения χ^2 для данного уровня значимости α и степеней свободы k.

Из соотношения (6) следует, что вероятность того, что наблюденное значение критерия $\chi^2_{\text{набл}}$ при условии, что гипотеза H верна, попадет в критическую область $\chi^2_{\text{набл}} > \chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k)$, где гипотеза H отвергается, равна уровню значимости α. Тогда

Таблица 3. Вычисление статистики χ^2

i	Интервал $[x_i, x_{i+1}]$	Эмпирические частоты n_i	Вероятности p_i	Теоретические частоты np_i	$(n_i - np_i)^2$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	0.65 – 3.00 м	13	0.097	11.731	1.610	0.137
2	3.00 – 3.50 м	16	0.161	19.481	12.117	0.622
3	3.50 – 4.00 м	21	0.198	23.958	8.749	0.365
4	4.00 – 4.50 м	21	0.178	21.538	0.289	0.013
5	4.50 – 5.00 м	16	0.134	16.214	0.046	0.003
6	5.00 – 5.50 м	12	0.09	10.89	1.232	0.113
7	5.50 – 6.00 м	10	0.057	6.897	9.629	1.396
8	6.00 – 8.08 м	12	0.076	9.196	7.862	0.855
9	Σ	121	0.991	119.905	–	$\chi^2_{\text{набл}} = 3.504$

область принятия гипотезы H определится неравенством $\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}(\alpha, k)$.

Так как критерий χ^2 имеет χ^2-распределение при $n \to \infty$, то вариационный ряд разбит на интервалы таким образом, чтобы в каждый интервал попадало не меньше 10 вариант. Число интервалов m должно быть не очень малым, чтобы не потерять характерные особенности распределения максимального уровня, и не очень большим, так как при $m > 10$ мощность критерия уменьшается [12]. Оптимальное число m интервалов разбиения при данном объеме выборки $n = 121$ дано формулой Х. Стерджеса [12]:

$$m = 1 + 3.322\lg(n) \approx 8.$$

Так как при $n = 121$ $m = 8$, а количество оцениваемых параметров распределения λ и $\mu - r = 2$, то число степеней свободы $k = m - r - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$. По таблице χ^2-распределения [6, 11] для $k = 5$ и $\alpha = 0.05$ найдем критическое значение: $\chi^2_{\text{кр}}(0.05, 5) = 11.1$.

Для вычисления статистики χ^2 составлена табл. 3.

Так как

$$\chi^2_{\text{набл}} = 3.504 < 11.1 = \chi^2_{\text{кр}}(0.05, 5),$$

то расхождение между теоретическим и эмпирическим распределениями можно считать незначимым, а гипотезу H о том, что генеральная совокупность максимальных отметок уровня воды в Амуре в створе у Хабаровска имеет распределение вероятностей $F_0(x)$, описываемое формулой (5), можно считать правдоподобной.

Следует заметить, что гипотеза H не противоречит экспериментальным данным и правдоподобна даже при более жестких условиях, а именно – при существенно большем уровне значимости α. Так, при $\alpha = 0.50$

$$\chi^2_{\text{кр}}(0.50, 5) = 4.35 > 3.504 = \chi^2_{\text{набл}}.$$

Итак, можно считать доказанным тот факт, что генеральная совокупность максимальных уровней, из которой сделана выборка (табл. 1), имеет закон распределения вероятностей (5).

Известно, что с 1960-х гг. по настоящее время происходит интенсивное освоение территории бассейна Амура. К этому периоду относится ввод в эксплуатацию Зейской и Бурейской ГЭС, функционирование которых существенно повлияло на гидрологический режим Амура [17]. Кроме того, к этому периоду относится также начало интенсивной сельскохозяйственной деятельности на приамурских территориях, особенно на стороне Китая. Среди факторов, оказывающих влияние на водный режим Амура и его притоков, следует также отметить масштабные лесоразработки, пожары (в подавляющем количестве случаев рукотворные), строительство берегозащитных дамб, польдеров, мостовых переходов и т.д. Вся эта экстенсивная деятельность разрушает экосистемы водосборов, регулирующих речной сток, что в свою очередь приводит к нарушению гидрологического режима реки.

Поэтому представляется целесообразным оценить влияние хозяйственной деятельности на паводковую ситуацию на Амуре. Для этого разобьем выборку из табл. 1 на две подвыборки. Первая охватывает период с 1896 по 1960 г., т.е. время до наступления интенсивной хозяйственной деятельности (первые по порядку 65 членов выборки (табл. 1)). Вторая подвыборка охватывает период с 1961 по 2016 г., т.е. время интенсивного освоения Приамурских территорий (последние по порядку 56 членов выборки с порядковыми номерами от 66 до 121).

Аналогично, как и для выборки 1896–2016 гг., показано, что распределения вероятностей генеральных совокупностей максимальных уровней, из которых сделаны эти подвыборки, также относятся к I-му типу распределений максимальных значений.

Оценим параметры распределения μ и λ для подвыборки, охватывающей период с 1896 по 1960 г. Для этого по данным этой выборки (члены ряда из табл. 1 с порядковыми номерами от 1 до 65) с помощью формул (2), (3) при $n = 65$ вычислим выборочное среднее $\overline{z}$ и выборочное среднеквадратическое отклонение S:

$$\overline{z} = 4.52, \quad S = 1.23. \tag{7}$$

Подставив значения параметров из (7) в формулу (4) для оценки параметров распределения μ и λ, получим:

$$\mu = 3.97, \quad \lambda = 0.96. \tag{8}$$

Подставив полученные статистические оценки (8) для параметров μ и λ в формулу (1) для $F(x)$, получим закон распределения вероятностей $F_1(x)$ для выборки 1896–1960 гг.:

$$F_1(x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(x-3.97)}{0.96}\right)\right).$$

Аналогично по данным, приведенным в табл. 1 (члены ряда выборки с номерами от 66 до 121), с помощью формул (2)–(4) определены параметры распределения μ и λ для подвыборки, относящейся к периоду 1961–2016 гг. Мода распределения $\mu = 3.45$, параметр масштаба $\lambda = 0.93$.

Подставив полученные статистические оценки для параметров μ и λ в формулу (1) для $F(x)$, получим предполагаемый закон распределения вероятностей генеральной совокупности уровней $F_2(x)$ для выборки 1961–2016 гг.:

$$F_2(x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(x-3.45)}{0.93}\right)\right).$$

Функции распределения вероятностей $F_0(x)$, $F_1(x)$, $F_2(x)$, полученные выше для трех генеральных совокупностей годовых максимальных уровней Амура, отвечают соответственно трем выборкам максимальных уровней за периоды с 1896 по 2016 г., с 1896 по 1960 г. и с 1961 по 2016 г. Эти функции полностью описывают отвечающие им генеральные совокупности максимальных уровней воды.

Так как функция распределения вероятности $F(x) = P(X < x)$ – это вероятность того, что случайная величина X, возможные значения которой – максимальные годовые уровни реки, не превзойдет некоторого текущего уровня x, то $P(X \geq x)$ – это вероятность противоположного события, а именно – того, что случайная величина X превысит некий текущий уровень x. Так как $P(X \geq x) + P(X < x) = 1$, то вероятность того, что значение случайной величины X превысит некий текущий уровень воды x, выразится формулой $P(X \geq x) = 1 - F(x)$, а средний период повторяемости $T(x)$ соответствующих паводков выразится формулой

$$T(x) = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1 - F(x)}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приведем результаты расчетов, касающихся нескольких отметок уровня Амура в районе Хабаровска. Уровень 4.50 м – это выход воды на пойму. При таком уровне в окрестностях Хабаровска затапливаются острова, на которых располагаются дачные участки и хозяйственные постройки. Уровень 6.00 м – это опасное явление по градации МЧС. При этом уровне подтапливаются городские территории, происходит подъем грунтовых вод до подвалов домов при большой продолжительности стояния этого уровня. 8.08 м – это максимальный уровень воды на водомерном пункте во время катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. Это максимальный уровень подъема воды за весь период – 1896–2016 гг. – инструментальных наблюдений за уровнем воды в Амуре.

Результаты расчетов вероятностей (рисков) того, что уровень Амура превысит вышеупомянутые критические (в смысле паводковой опасности) отметки, а также результаты расчетов средних периодов повторяемости таких превышений приведены в табл. 4.

Проанализируем данные, приведенные в табл. 4. В первой строке этой таблицы приведены вероятности превышений соответствующих уровней и средние периоды повторяемости этих превышений, полученные на основе анализа функции распределения вероятностей $F_1(x)$. В свою очередь, эта функция построена на основе анализа данных выборки (табл. 1) за период с 1896 по 1960 г. Иными словами, все превышения и периоды повторяемости, отображенные в первой строке табл. 4, получены для случая малого хозяйственного освоения Приамурья.

Во второй строке табл. 4 приведены те же параметры превышений и повторяемостей, но только для функции распределения вероятностей $F_0(x)$, построенной на основе анализа выборки за весь период инструментальных наблюдений с 1896 по 2016 г.

В третьей строке табл. 4 те же данные относятся к функции распределения вероятностей $F_2(x)$. Так как эта функция построена на основе анализа данных выборки за период с 1961 по 2016 г., то полученные в этой строке значения вероятностей превышения и повторяемости этих превышений относятся к случаю интенсивного хозяйственного освоения Приамурских территорий.

Таблица 4. Вероятности $P(X \geq x)$, %, превышения уровней Амура и периоды их повторяемости $T(x)$ (X – случайная величина, возможные значениям которой – максимальные годовые уровни реки; x – уровень, м; вероятности превышения которого рассчитаны для x = 4.50, 6.00 и 8.08 м)

$F(x)$	$P(X \geq 4.50)$	$P(X \geq 6.00)$	$P(X \geq 8.08)$	$T(4.50)$	$T(6.00)$	$T(8.08)$	Мода распределения
$F_1(x)$	44	11	1.4	2.29 лет	8.81 лет	72.95 лет	3.97 м
$F_0(x)$	37	9	0.9	2.73 лет	11.76 лет	109.20 лет	3.78 м
$F_2(x)$	28	6	0.7	3.63 лет	16.00 лет	144.42 лет	3.45 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ вероятностей превышения уровней и средних периодов их повторяемости для каждого уровня в отдельности позволяют сделать следующие выводы.

Сравнение периодов слабого хозяйственного освоения и интенсивного хозяйственного освоения бассейна Амура показало, что при интенсивном хозяйственном освоении риск возникновения больших паводков на Амуре с превышениями уровней 6.00 и 8.08 м уменьшился в ~2 раза и средние интервалы их повторяемости возросли также в ~2 раза. Таким образом, интенсивная хозяйственная деятельность в период с 1961 по 2016 г. улучшила паводковую ситуацию на Амуре. При этом риск повторений катастрофического паводка 2013 г. на Амуре с превышениями уровня 8.08 м уменьшился с 1.4 до 0.7%, а интервалы их повторяемости возросли с 73 до 144.4 лет.

Для всего периода инструментальных наблюдений на Амуре – с 1896 по 2016 г. (функция распределения вероятностей $F_0(x)$), объединяющего периоды слабого и интенсивного хозяйственного освоения Приамурья, числовые данные о вероятностях превышения соответствующих уровней и средних периодов их повторяемости занимают промежуточное положение между этими двумя периодами. В частности, средний период повторяемости катастрофического наводнения 2013 г. составляет здесь 109 лет, а вероятность такого наводнения составляет 0.9%.

Моды распределений $F_1(x)$, $F_0(x)$, $F_2(x)$ закономерно уменьшаются от 3.97 м для распределения $F_1(x)$ до 3.45 м для распределения $F_2(x)$; т.е. интенсивное хозяйственное освоение Приамурских территорий в период с 1961 по 2016 г. привело к понижению наиболее вероятного уровня воды на 0.5 м по сравнению с тем уровнем, который мог быть при слабом хозяйственном освоении территорий Приамурья.

Результаты проведенного анализа отметок максимальных годовых уровней воды при прохождении катастрофических паводков будут полезны для разработки конкретных мер по минимизации негативных последствий возможных в ближайшие годы повторных крупных наводнений на реках бассейна Амура. Они позволят уточнить многие аспекты водного режима р. Амур и крупных притоков его бассейна в условиях часто повторяющихся наводнений, характерных для дальневосточного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В.А., Быков А.А., Щетинин Е.Ю.* Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения: М.: МЧС ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. 524 с.
2. *Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.Л.* Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году, анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природ. ресурсы. 2015. № 3. С. 17–26.
3. *Быков А.А.* Приложения асимптотической теории вероятностей экстремальных значений к прогнозированию риска экстремальных чрезвычайных ситуаций // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012. № 1. С. 53–63.
4. *Вадзинский Р.Н.* Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.
5. *Гарцман Б.И.* Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 241 с.
6. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1998. 479 с.
7. *Губарева Т.С., Гарцман Б.И.* Оценка параметров распределений экстремальных гидрологических величин методом L-моментов // Вод. ресурсы. 2010. № 4. С. 1–10.
8. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
9. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С.* Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Вод. ресурсы. 2014. № 2. С. 111–122.
10. *Дугина И.О.* Выдающееся наводнение на Амуре 2013 года и его особенности. Взгляд гидролога // Наводнение-2013. Талакан: РусГидро, 2014. С. 41–57.
11. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Введение в математическую статистику. М.: ЛКИ, 2017. 600 с.
12. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 816 с.

13. *Лидбеттер М., Линдгрен Г., Ротсен Х.* Экстремумы случайных последовательностей и процессов. М.: Мир, 1989. 392 с.

14. *Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А.* Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестн. ДО РАН. 2014. № 2. С. 5–14.

15. *Писаренко В.Ф., Болгов М.В., Осипова Н.В., Руковишникова Т.А.* Применение теории экстремальных событий в задачах аппроксимации распределений вероятностей максимальных расходов воды // Вод. ресурсы. 2002. № 6. С. 645–657.

16. *Семенов Е.К., Соколихина Н.Н., Татаринович Е.В., Тудрий К.О.* Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 25–34.

17. *Хазиахметов Т.Р.* Зейская и Бурейская ГЭС в пропуске аномального паводка 2013 года // Наводнение–2013. Талакан: Изд-во РусГидро, 2014. С. 59–68.