

УДК: 551.466

## **Экстремальные высоты штормовых нагонов на побережье о. Сахалин**

*Э. Като, Ю. В. Любичкий, Г. В. Шевченко*<sup>1</sup>

Приведены сведения о статистических свойствах опасных подъемов уровня моря – штормовых нагонов на побережье о. Сахалин. Методами стандартной экстремальной статистики рассчитаны высоты нагонов редкой повторяемости. Оценки, полученные для стационарных самописцев уровня моря, распространялись на прилегающие участки побережья методами численного моделирования. Рассмотрены вопросы, связанные с наложением нагона на прилив.

### **The extreme surge heights on the coast of Sakhalin Island**

*Akai Kato – Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Yury Lyubitsky – Far East Hydrometeorological Institute, Georgy Shevchenko – Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk.*

The information about the statistical properties of the hazardous sea-level rises – storm surges on the coast of Sakhalin Island is provided. The extreme surge heights of rare occurrence were estimated using standard Gumbel method. Estimates obtained for stationary tide gauges, spread to the adjacent strip of the coast using numerical simulation. The problem of the surge and high tide superposition is considered.

### **Введение**

Штормовые нагоны представляют собой значительный подъем уровня моря в результате падения приземного атмосферного давления и действия ветров нагонных направлений (ориентированных в сторону берега или под углом к нему, но таким образом, чтобы в северном полушарии берег находился справа относительно вдольберегового воздушного потока) и связаны обычно с прохождением циклона или тайфуна. Штормовые нагоны в ряде районов являются грозным стихийным явлением, вызывающим затопление обширных низменных территорий, гибель урожая, разрушение промышленных объектов и жилых домов и приводящим к человеческим жертвам (см. статью Белоненко и Шевченко в наст. сборнике). К таким районам относятся

---

<sup>1</sup> *Като Экайэ* – директор Сахалинского метеоагентства, Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Южно-Сахалинск; *Любичкий Юрий Вадимович* – кандидат географических наук, Дальневосточный гидрометеорологический институт, г. Хабаровск; *Шевченко Георгий Владимирович* – заведующий лабораторией цунами Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, доктор физико-математических наук, г. Южно-Сахалинск.

прежде всего Бенгальский, Мексиканский и Финский заливы, а также южная часть Северного моря.

На Сахалине наиболее значительные нагоны наблюдаются в Сахалинском заливе и Амурском лимане. Этому способствует сочетание ряда морфологических и гидрометеорологических факторов – в частности, обширного залива с низменными берегами и устойчивых нагонных ветров северных и северо-западных румбов в тыловой части циклона, пересекающего остров с запада на восток. Максимальная нагонная волна (наибольшая во всем Дальневосточном регионе) была зафиксирована 15–19 октября 1977 г., по измерениям в порту Москальво отклонение от среднего уровня составило 272 см. Были размыты полотно железной дороги протяженностью 1500 м и подъездные пути, разрушено около 300 м шоссеиной дороги, залиты пирсы и служебные помещения. В поселке Рыбновск был разрушен пирс, смыло кран и различные материальные ценности.

В южной части острова Сахалин величина штормовых нагонов существенно меньше – максимальные значения составили около 1,4 м на юго-восточном и около 1 м на южном и юго-западном участках побережья. Причем нагоны 15–16 декабря 1981 г., 9–10 ноября 1990 г. и 8–9 ноября 1995 г., когда нагонные волны достигали максимальной интенсивности, привели к очень серьезному материальному ущербу [9, 4].

Экстремальные нагоны, вызывающие значительный материальный ущерб и приводящие к человеческим жертвам – явление весьма редкое, в противном случае люди были бы вынуждены покинуть территории, подверженные слишком высокой степени риска, либо строить специальные защитные сооружения – типа системы дамб, созданных в районе Хук-ван-Холланда (Нидерланды), Нового Орлеана (США) и Санкт-Петербурга. С этой точки зрения расчет интенсивности и повторяемости штормовых нагонов (а для приливных морей – возможных высот суммарного уровня) представляется очень важной задачей. В данной работе рассматриваются методические аспекты данной задачи применительно к побережью о. Сахалин.

### **Статистические свойства нагонов**

Обычно для оценки возможных высот штормовых нагонов редкой повторяемости привлекаются стандартные методы экстремальной статистики [1, 2], но сначала рассмотрим общие статистические свойства изучаемого явления.

Когда имеется представительный материал наблюдений (многолетние ряды колебаний уровня, предварительно очищенных от приливов и сезонных вариаций), свойства изучаемого явления можно проанализировать при помощи вероятностной модели в представлении выхода случайного процесса за определенный уровень. Хорошо известно, что при достаточно большом значении порогового уровня распределение числа положительных выбросов

нормального процесса за определенный интервал времени  $T$  соответствует закону Пуассона.

Ряды ежечасных значений остаточного уровня для ряда станций Дальнего Востока России в работах [10, 11, 12] рассматривать как случайный процесс, близкий к нормальному с нулевым средним. Среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) для большинства береговых самописцев уровня моря Сахалина и Курильских островов составляет 10–12 см, и только на нескольких станциях в отдельные годы его величина достигает 14–15 см. В этом смысле даже умеренный нагон (к ним относятся события с высотой подъема уровня от 40 до 75 см) представляется аномальным положительным выбросом, выходящим за пределы  $3\sigma$ .

Величина временного интервала  $T$  выбиралась равной одному году, для каждой станции по полному годовому ряду ежечасных уровней определялось число нагонов, превысивших 40 см. Затем, путем суммирования по всему набору полных серий, строилась гистограмма, отражающая относительные частоты числа реально наблюдавшихся нагонов за год, и проверялось ее соответствие распределению Пуассона. В табл. 1 приведены рассчитанные параметры полученных распределений (среднее и дисперсия) для некоторых станций, соответствующее значение параметра аппроксимирующего распределения  $\lambda$ , которое имеет смысл характерной для данного пункта плотности потока событий (число случаев в год). Значение  $\lambda$  выбиралась из принципа минимума величины  $\chi^2$ , характеризующей меру расхождения между теоретическим и наблюдаемым распределением по критерию Пирсона. В табл. 1 приведены значения  $\chi^2$  для выбранных станций, соответствующие значения уровня значимости определялись по известным таблицам с учетом числа степеней свободы. Степень согласия находится на уровне 90–95 %, кроме станций Поронайск, Курильск и Матуа.

Очевидно, пороговое значение 40 см для станции Поронайск было недостаточно большим, и, вероятно, оказалось близким к границе, разделяющей два различных распределения числа максимумов случайного процесса (удовлетворительное согласие отмечено для нагонов с высотой более 50 см). На станции Курильск для экстремальных нагонов (высота подъема уровня более 75 см) этот закон выполняется с высокой точностью, а на станции Матуа – только для катастрофических нагонов с высотой волны более 1 м. Количество этих нагонов (11 случаев за 18 лет наблюдений) необычайно велико, в особенности учитывая маленькие размеры острова и короткий приглубый шельф вблизи него. Причина, по которой здесь столь интенсивны штормовые нагоны, остается невыясненной.

Если выбросы процесса распределены по закону Пуассона, интервалы между ними должны быть распределены экспоненциально со средним значением интервала и среднеквадратическим отклонением, равными  $1/\lambda$ . В табл. 1 также приведены значения указанных параметров (в месяцах) для сахалинских станций, определенные по рядам ежечасных остаточных уровней. Из

табл. 1 видно, что полученные значения в целом удовлетворительно согласуются с вычисленными величинами  $\lambda$ , несмотря на то, что реальное распределение интервалов, хотя и имеет некоторое сходство с экспоненциальным, носит все-таки сложный, многомодовый характер. На всех станциях соответствующие гистограммы имеют максимумы, соответствующие интервалам около одного, шести и 11 мес. Причина многомодовости заключается в выраженной сезонной неравномерности интенсивности штормовых нагонов (данный вопрос подробно обсуждается ниже). Эта неравномерность не проявляется при вычислении среднего числа максимумов, так как выбор интервала времени  $T$  равным одному году ее элиминирует. При увеличении порогового значения влияние данного фактора уменьшается, и эмпирическое распределение интервалов между событиями хорошо согласуется с теоретическим.

**Таблица 1**  
Статистические свойства штормовых нагонов

Станция	Период $T$ , лет	Порог $h$ , см	Число событий, $N$	Параметры гистограммы			Распред. интервалов		Параметр Пуассона $\lambda$	Критерий Пирсона $\chi^2$
				$k$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$\sigma_i$		
Северо-Курильск	23	40	53	6	2,3	1,4	5,0	4,7	2,3	4,6
		40	88	10	4,9	3,0	2,5	2,5	4,9	5,7
Матуа	18	75	24	5	1,3	1,1	8,6	8,6	1,3	3,1
		100	11	4	0,6	0,4	18,4	13,2	0,6	0,7
		40	90	7	3,2	1,7	3,7	3,7	3,2	6,0
Курильск	28	75	22	4	0,8	0,6	15,3	13,9	0,8	0,45
		100	8	3	0,3	0,2	35,7	17,1	0,3	0,07
Буревестник	21	40	45	7	2,1	3,3	5,4	7,0	2,1	5,1
		75	7	4	0,3	0,6	36,7	23,2	0,4	4,6
Малокурильское	19	40	13	3	0,7	0,5	17,4	17	0,7	0,06
Поронайск	34	40	103	10	3,8	1,3	3,1	2,4	3,8	3,6
		50	23	4	1,7	1,2	7,2	5,3	1,7	0,5
Стародубское	23	50	70	7	3,8	2,6	3,2	3,2	3,8	2,4
Корсаков	41	40	43	6	2,0	1,6	5,9	5,6	2,0	1,0
м. Крильон	26	40	61	7	2,5	1,6	4,8	4,4	2,5	1,6
Невельск	26	40	35	4	1,4	1,4	8,2	7,8	1,4	0,9
Холмск	51	40	47	5	0,8	0,7	13,9	10,5	0,8	1,3
Углегорск	27	40	51	6	2,1	1,3	5,7	5,8	2,1	0,5

Вычисленный для каждой станции параметр распределения  $\lambda$  имеет смысл средней частоты умеренных нагонов (число случаев в год) и его удобно использовать для сравнительной характеристики различных участков побережья по повторяемости этого опасного явления. Значения параметра сильно колеблются на дальневосточном побережье и составляют около пяти случаев в год на о. Матуа (наибольший показатель), четырех в заливе Терпения,

около трех в Курильске и примерно один случай в год в Холмске (наименьший).

### Расчет высот нагонов редкой повторяемости

Хорошее соответствие выбросов процесса (нагонов) закону Пуассона дает основания использовать для расчета высот экстремальных нагонных уровней редкой повторяемости традиционный метод экстремальной статистики, основанный на аппроксимации эмпирических функций распределения двойным экспоненциальным законом [1, 2]:

$$1 - P(H) = EXP(-EXP(-Y)), \quad (1)$$

где  $P(H)$  – вероятность превышения уровня  $H$ , а  $Y$  – приведенная переменная. Эмпирические вероятности чаще всего рассчитываются по формуле Вейбулла  $P_i = i/N+1$ , где  $i$  – порядковый номер максимума в выборке, ранжированной по убыванию, хотя есть и другие способы [2, 3].

Обычно для колебаний уровня моря принимается, что приведенная переменная линейным образом связана с исследуемой статистической переменной  $y$  (первое предельное распределение):

$$H = A \cdot Y + B. \quad (2)$$

Для определения параметров функции распределения  $A$  и  $B$  (они рассчитывались методом среднегеометрических с одновременной минимизацией ошибки по  $H$  и  $Y$ ) использовались два основных подхода: при первом исследуемые выборки формировались из годовых максимальных значений высот штормовых нагонов; при втором в выборку включались все ситуации, когда высота нагона превышала заданное пороговое значение, в качестве которого можно использовать, например, 40 см. Использование порогового значения связано с тем, что во многих случаях годовые максимумы в «спокойные» по метеорологическим условиям годы будут иметь завышенную оценку эмпирической вероятности. Это связано с тем, что в годы с более активным характером атмосферных процессов может быть несколько, иногда пять-шесть более значимых подъемов уровня. В целом это выглядит как неоправданное смещение вправо точек, отвечающих самым слабым экстремумам, и, следовательно, завышение расчетных значений высот редкой повторяемости. Впрочем, для всех станций Сахалина и Курильских островов оценки достаточно хорошо согласуются между собой – вероятно, указанный эффект существенен только при сравнительно коротких выборках (или при существенно более низких значениях экстремумов в спокойные годы), а когда длина ряда превышает 20–25 значений, его влияние сравнительно невелико.

Гораздо более существенной проблемой является выбор эмпирической вероятности при наличии в выборке экстраординарных событий, которые резко выделяются из общей статистики. Приписываемая по формуле Вейбул-

ла и фактическая вероятность такого экстремума могут различаться очень сильно, что приводит к весьма значительному завышению расчетных высот нагонных волн редкой повторяемости, даже при достаточно большой продолжительности наблюдений. Рассмотрим в качестве примера штормовой нагон 10–11 ноября 1990 г., который привел к значительному материальному ущербу в южной, наиболее населенной и развитой, части острова Сахалин. Циклон, центр которого располагался в южной части Татарского пролива, вызвал подъем уровня, превысивший отметку 75 см во всех пунктах, кроме Углегорска (где высота данного максимума составляла 63 см – вторая за многолетний период наблюдений), а в Холмске, Невельске и Поронайске превысила 100 см.

На рис. 1 представлены эмпирические распределения годовых максимумов неперiodической составляющей уровня моря для главных портов о. Сахалин Корсаков и Холмск. В Холмске высота нагонной волны в ноябре 1990 г. составила 94 см. Для сравнения, второй за анализирувавшийся период наблюдений по величине нагон, отмеченный в апреле того же года и вызвавший значительные разрушения бетонированного берегозащитного укрепления сданной незадолго до этого в эксплуатацию железнодорожной станции Холмск-сортировочная [9], была на 26 см ниже. Это очень большое различие, так как весь диапазон изменения годовых максимумов, за исключением нагона 1990 г., составлял 40 см. Это говорит об экстраординарности события, попавшего в выборку. Аналогичная ситуация отмечена и в Корсакове – главный максимум составлял 90 см при том, что следующий по величине (один из немногих, нанесших материальный ущерб портовому хозяйству, имел высоту 66 см) наблюдался 2 декабря 1978 г.

Согласно результатам расчета, период повторяемости нагона 10–11 ноября 1990 г. для Холмска составил около 500 лет, для Корсакова – 250 лет. Соответствующие этим периодам вероятности намного (для Холмска на порядок) меньше эмпирических значений, полученных по формуле Вейбулла, что говорит о сложности данного вопроса. Если же главные максимумы исключить из расчета, то периоды их повторяемости составят около 1500 и 1000 лет для рассматриваемых пунктов, что, очевидно, также далеко от реальности, как и приписываемые исходя из длины ряда наблюдений. На станции Стародубское аналогичным экстраординарным событием являлся нагон 14–15 декабря 1981 г. (137 см против 90 см у следующего по величине). В то же время в расположенных на незначительном удалении пунктах Углегорск и Поронайск выборки достаточно однородны и не содержат резко выделяющихся максимумов, соответственно, трудностей с расчетом нагонов редкой повторяемости не возникает.

Приведенные примеры показывают, какое значение при долгосрочном прогнозе экстремальных уровней имеет наличие в выборках таких экстраординарных событий, которые способны существенно изменить представление о степени опасности в рассматриваемом пункте. Вообще говоря, обоснован-

ного метода, позволяющего разумным способом более объективно оценить вероятность резко выделяющегося экстремума, пока не предложено.

Однако в некоторых случаях наблюдаемое распределение экстремумов плохо согласуется с рассмотренной выше линейной зависимостью экстремумов от приведенной переменной. В качестве примера можно привести упорядоченную выборку максимумов уровня на станции Певек (рис. 2). В таких случаях применяют нелинейную аппроксимацию зависимости между изучаемой величиной и приведенной переменной  $y$ . В данном случае наблюдается заметное уменьшение роста высот уровня при больших значениях приведенной переменной (то есть в области малых вероятностей). В таких случаях применяют третье предельное распределение, в котором данная зависимость выражается формулой [3]:

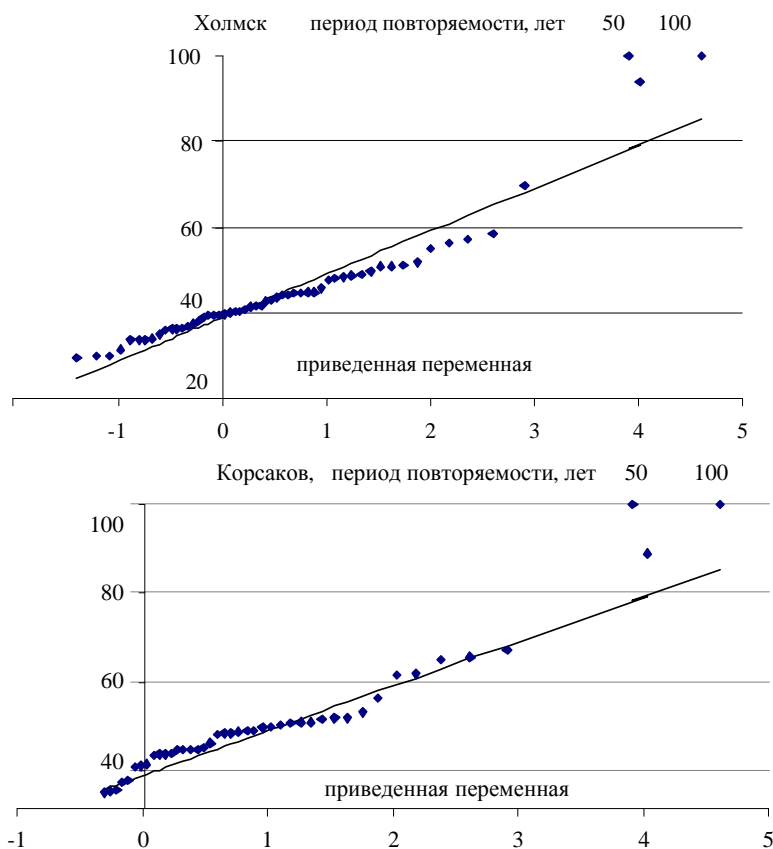
$$y = k(\ln(v-\omega) - \ln(\omega-h)) \quad (3)$$

где  $k$ ,  $v$  и  $\omega$  – неизвестные параметры, которые нужно определить по наблюдаемым значениям  $h_i$  и соответствующим им значениям приведенной переменной  $y_i$  (здесь  $\omega$  – предельная высота, которую не может превысить изучаемый параметр). Для нелинейной зависимости при определении неизвестных параметров обычно используют метод моментов. Но так как согласно [3] оценки с помощью метода моментов недостаточно точны, во многих случаях предпочтение отдается итерационной процедуре решения нелинейной системы уравнений, возникающей из принципа максимума правдоподобия. Однако наиболее простым методом представляется иная итерационная процедура, реализующая метод последовательных приближений. Вначале можно задать некое начальное значение предельной высоты  $\omega_1$ , из возникающей системы с двумя неизвестными методом наименьших квадратов находились значения  $v_1$  и  $k_1$ . Затем для этих значений рассчитывается  $\omega_2$ , и т. д. При разумном выборе начального значения итерационная процедура быстро сходится.

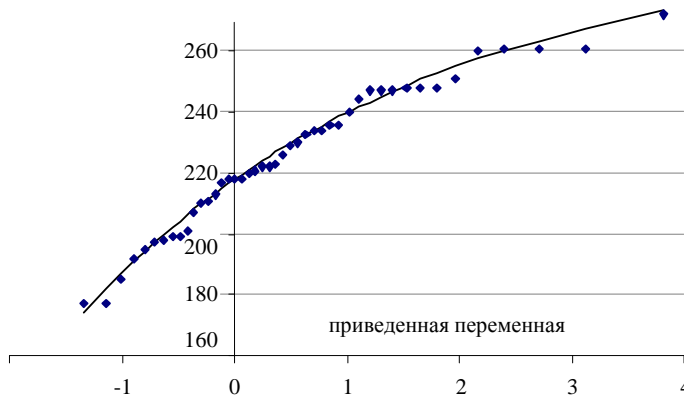
**Таблица 2**

Максимальные за период наблюдений величины нагонов и возможные их высоты редкой повторяемости (в скобках указаны их доверительные 68-процентные интервалы), в сантиметрах, для мареографных станций Сахалина

Станция	$h_{\max}$	Период повторяемости, годы		
		25	50	100
Углегорск	74,8	75,0 (6,2)	81,5 (7,5)	87,9 (8,8)
Холмск	93,9	72,3 (5,1)	79,6 (6,2)	86,8 (7,2)
Невельск	97,7	82,0 (8,4)	90,4 (10,1)	98,7 (11,8)
м. Крильон	112,3	103,0 (11,8)	115,1 (14,2)	127,0 (16,6)
Корсаков	89,7	72,4 (4,8)	78,5 (5,8)	84,7 (6,8)
Стародубское	130,8	113,1 (12,6)	125,2 (15,2)	137,3 (17,8)
Поронайск	112,2	104,8 (9,2)	115,5 (11,1)	126,2 (13,0)



**Рис. 1.** Эмпирические распределения годовых максимумов неперiodической компоненты уровня моря на станциях Холмск и Корсаков, и их аппроксимация линейной зависимостью



**Рис. 2.** Эмпирическое распределение годовых максимумов неперiodической компоненты уровня моря на станции Певек, и его аппроксимация третьим предельным распределением



Скорее всего, именно третье предельное распределение является наиболее адекватным для оценки экстремальных высот штормовых нагонов редкой повторяемости, так как физически трудно себе представить их неограниченный рост. Скорее всего, чтобы наблюдалось характерное для данного распределения уменьшение роста экстремумов в области очень малых вероятностей, отвечающее наличию предельной высоты, необходимы более продолжительные ряды наблюдений – по крайней мере, примерно на порядок по сравнению с имеющимися на сегодняшний момент массивами данных.

### **Построение карт интенсивности и повторяемости штормовых нагонов**

Одна из важных задач при расчете экстремальных высот штормовых нагонов – распространение полученных для места расположения стационарного пункта наблюдений за уровнем моря на прилегающие участки побережья. Эта задача достаточно сложна для северного и дальневосточного побережья России из-за малой плотности измерительной сети и короткого периода работы многих береговых постов, а также сложного характера рельефа дна и топографии береговой черты в указанных районах.

Для построения карт интенсивности и повторяемости штормовых нагонов В. Х. Германом [2] была предложена методика, основанная на построении региональных функций распределения. Она основана на том соображении, что действие циклона, который является причиной формирования нагонного подъема уровня моря, охватывает достаточно большие участки побережья, что позволяет распространять оценки, полученные на станциях с продолжительными измерениями, на прилегающие районы с учетом передаточных коэффициентов, рассчитанных за время работы временных береговых постов. Аналогичная идея используется и при построении карт цунамиопасности – эти волны обладают еще большим радиусом корреляции по сравнению с нагонами, поэтому средняя частота цунами является устойчивым региональным параметром (использование функции повторяемости вместо функции распределения представляется в этом смысле более удачным) [13].

Развитием этой идеи является метод, применявшийся при детальном цунамирайонировании побережья залива Анива [8]. Данный подход сочетает вероятностный анализ данных многолетних наблюдений над уровнем моря на береговых гидрометеорологических станциях и численное гидродинамическое моделирование анализируемых явлений. Применительно к штормовым нагонам данный метод был адаптирован на примерах южного и юго-восточного побережья о. Сахалин [5], и включает несколько последовательно выполняемых этапов.

1. Для «опорных» точек, в которых производились многолетние наблюдения при помощи самописцев уровня моря, на основе годовых максимумов непериодической составляющей уровня моря строились эмпирические функ-

ции распределения штормовых нагонов и определялись высоты волн редкой повторяемости.

2. С помощью численного гидродинамического моделирования рассчитывались пространственно-временные изменения сгонно-нагонной составляющей уровня моря в пределах исследуемого района во время наиболее значительных нагонов и сгонов. Целью данной работы являлась оценка максимальных величин нагонов и сгонов как в «опорных» точках, так и в других пунктах, расположенных на изучаемом участке побережья, включая объекты, где наблюдения над уровнем моря производились в течение короткого времени или совсем не выполнялись.

3. В указанных работах расчеты выполнялись с помощью двумерной нелинейной нестационарной численной гидродинамической модели, построенной в рамках теории мелкой воды [7]. Поскольку методы численного моделирования длинноволновых процессов быстро развиваются, следует использовать наиболее современные и развитые модели.

Что касается указанных примеров, то на юго-восточном побережье о. Сахалин имеется две такие береговые гидрометеорологические станции с продолжительным сроком измерений уровня моря – Стародубское и Поронайск, на побережье залива Анива также две станции – Корсаков и м. Крыльон. Наличие двух станций позволяло контролировать точность работы численной модели исходя из результатов сравнения рассчитанных и измеренных ежечасных значений уровня моря во время значительных штормовых нагонов. Такое сравнение было выполнено для восьми штормовых ситуаций, когда в изучаемом районе формировались нагонные волны наибольшей высоты.

Максимальные величины нагонов в различных пунктах побережья, рассчитанные с помощью численного моделирования, нормировались для каждой ситуации на их соответствующие значения в «опорной» точке. Оказалось, что для юго-восточного побережья, несмотря на сравнительно небольшие размеры района, штормовые нагоны на станциях Стародубское и Поронайск формируются различными циклонами – для первой из них нагонноопасными направлениями ветра являются северо-восточное и северное, для второй – южное и юго-восточное. Примеры пространственного распределения высот нагонных волн при штормовых ситуациях различных типов представлены на рис. 3. Как следует из результатов моделирования, зона ответственности каждой из станций разделяется, эта граница расположена в районе г. Макаров. Таким образом, для разных участков побережья только одна станция может рассматриваться как опорная, а вторая используется для оценки качества численного моделирования.

Ввиду крупномасштабности исследуемых природных процессов данная технология в некоторой степени позволяет уменьшить систематические погрешности отдельных численных расчетов, являющиеся следствием недоста-

точно надежного определения характеристик ветра и приземного атмосферного давления над морем.

Полученные указанным способом значения передаточных коэффициентов осреднялись для каждого пункта в отдельности.

Для определения экстремальных величин нагонов и сгонов редкой повторяемости в конкретном пункте, рассчитанные для него средние значения передаточных коэффициентов умножались на соответствующие оценки высот штормовых нагонов редкой повторяемости в «опорной» точке.

## **Наложение нагона на прилив**

Английскими учеными D. Pugh и J. Vassie [14, 15] был предложен оригинальный метод расчета экстремальных высот суммарного уровня редкой повторяемости, основанный на композиции распределений приливной и непериодической компонент, рассчитанных по отдельности. Авторами идеи было отмечено, что предложенный ими метод весьма перспективен для объектов, расположенных в районах, где наблюдения за колебаниями уровня моря производились в течение сравнительно короткого промежутка времени – в частности, они применяли данный подход для плавучих буровых установок в Северном море. Аналогичная задача стояла и для северо-восточного шельфа о. Сахалин, на котором было выполнено достаточно большое число измерений уровня моря с буровых установок или при помощи автономных регистраторов продолжительностью от двух недель до нескольких месяцев. Основная идея данной разработки заключается в том, что для экстремального подъема уровня нужно наложение штормового нагона на высокую воду прилива, вероятность чего достаточно мала. Поэтому для реализации подобных ситуаций необходимы измерения достаточно большой продолжительности – более длительные, чем при регистрации простых (не являющихся комбинацией нескольких составляющих) процессов, таких, например, как землетрясения. В методе композиции распределений вероятность такого наложения оценивается объективно вне зависимости от того, имело место такое наложение на практике или нет.

Рассмотрим особенности данного метода на примере порта Корсаков, расположенного в заливе Анива в южной части о. Сахалин, в котором нагоны развиваются на фоне значительных приливных колебаний. На рис. 4 приведены отрезки исходных и остаточных (полученных после фильтрации прилива и вычитания среднего месячного значения) записей уровня длительностью в одну неделю. Первая из них содержит штормовой нагон 22–23 сентября 1986 года, который имел высоту 50 см, но почти совпал с моментом полной воды прилива, близкого к сизигийному. Максимальный суммарный уровень превысил отметку два метра над нулем поста мареографа, при таких высотах обычно и наблюдается заливание порта. Из-за такого неблагоприятного совпаде-

ния средний по величине нагон привел к серьезным негативным последствиям.



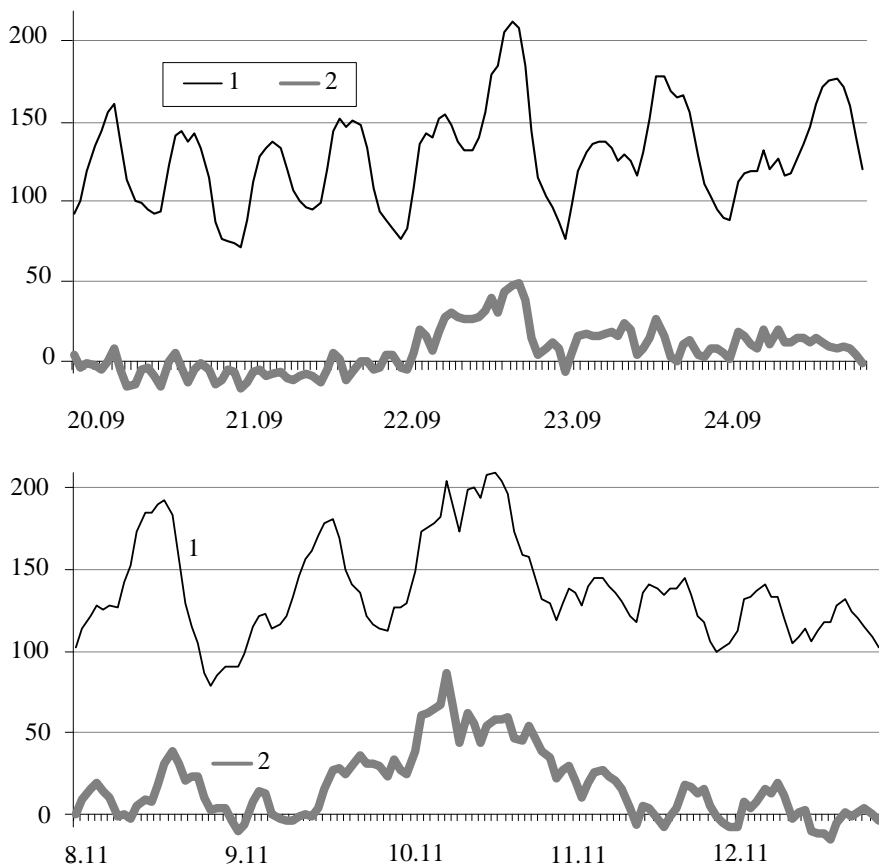
Рис. 3. Пространственное распределение максимальных высот нагонов 14–15 декабря 1981 г. (слева) и 8–9 ноября 1995 г. (справа) по результатам численного моделирования

По иному развивались события в ноябре 1990 года. Здесь гораздо более мощный нагон (90 см) пришелся на момент начала прилива, поэтому суммарный уровень имеет сложную структуру с двумя максимумами (рис. 4, нижний). Один из них соответствует максимуму нагона при малом значении приливного уровня, другой – максимуму прилива при спадании нагона. В итоге суммарный уровень оказался примерно таким же, как и в 1986 году.

Таким образом, если ограничиваться, как это широко распространено на практике, только анализом распределения годовых максимумов суммарного уровня, наблюдавшийся сильнейший штормовой нагон не оказывает в этом случае практического влияния на итоговые оценки, применяемые в проектировании. В то же время принципиальная возможность его существует, а, следовательно, и существует вероятность его наложения на фазу высокого прилива. Отсюда можно сделать вывод, что традиционный метод дает заниженную оценку высоты экстремального суммарного уровня.

Подтверждением этому стал и штормовой нагон 8–9 ноября 1995 года. Высота нагонной волны была примерно такой же, как и 10 ноября 1990 года, однако максимум нагона пришелся на уменьшающийся, но еще не маленький

приливной. Этим, в частности, объясняется наблюдавшееся в данном случае наиболее сильное затопления города и порта.



**Рис. 4.** Отрезки записи длительностью пять суток (1 – исходный, 2 – остаточный уровень), содержащие штормовые нагоны: 22–23 сентября 1986 года – случай совпадения умеренного нагона с полной водой прилива (верхний рисунок); 9–10 ноября 1990 г. – случай совпадения сильного нагона с началом подъема приливного уровня (нижний).

Выполненный анализ штормовых нагонов позволяет получить более точные оценки методом композиции распределений приливной и метеорологической составляющей уровня, каждая из которых определяется по отдельности.

Хотя приливные колебания уровня моря представляют детерминированный процесс, который может быть с высокой точностью рассчитан на любой момент времени, случайный характер появления штормовых нагонов приводит к тому, что наложение его на прилив носит случайный характер. Чтобы описать распределение суммарных уровней, следуя [9, 14] представим его в виде композиции распределений приливной и метеорологической составляющей.

Изменения уровня моря во времени представим в виде суммы основных компонент:

$$\zeta(t) = \zeta_t(t) + \zeta_m(t), \quad (4)$$

где  $\zeta_t$  – приливная составляющая (с ней объединены квазидетерминированные сезонные вариации, отличающиеся относительно устойчивыми фазами и слабо меняющимися амплитудами), а  $\zeta_m$  – метеорологическая, включающая штормовые нагоны. Поскольку эти составляющие вызываются различными, не зависящими друг от друга причинами, поэтому сами компоненты также можно считать независимыми, тогда совместную плотность вероятности уровней колебаний можно определить в виде свертки (Pugh, Vassie, 1979):

$$P_s(\zeta) = \int P_t(x) P_m(\zeta-x) dx, \quad (5)$$

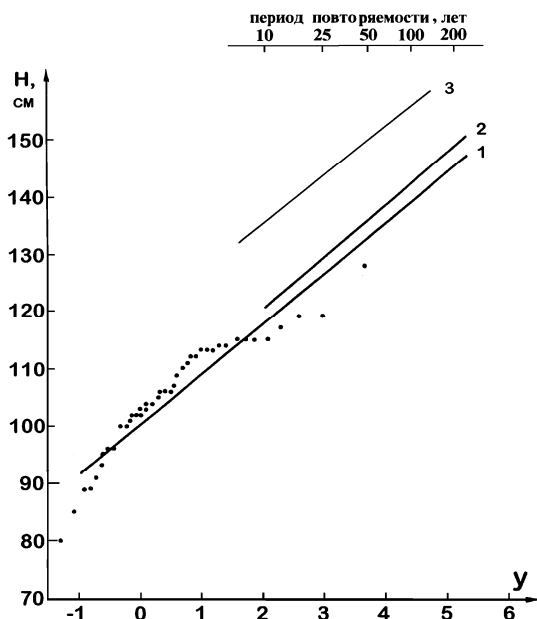
где  $P_t$ ,  $P_m$  – плотности вероятности соответствующих компонент. Плотность вероятности приливных колебаний можно представить в виде гистограммы 19-летнего приливного ряда, предвычисленного по основным для изучаемого района приливным волнам (для учета квазипериодических сезонных вариаций следует добавить годовую и полугодовую гармоники). Предвычисление на 19 лет необходимо выполнять для учета изменчивости величины приливов с периодом 18,6 лет, имеющей для побережья Сахалина существенное значение. При этом приливная составляющая не может превысить уровень, максимальный по полученному ряду.

Плотность вероятности метеорологических вариаций описывается гистограммой 22-летнего ряда остаточных колебаний. Интегрирование в формуле (5) можно заменить на суммирование. Эта операция означает, что максимальный возможный уровень, равный сумме максимумов в гистограммах, будет иметь вероятность, равную произведению вероятностей в соответствующих гистограммах. Следующее значение, меньшее максимально возможного на шаг гистограммы, может явиться суммой наибольшего приливного и второго по величине метеорологического либо максимального метеорологического и второго по величине приливного, его вероятность равна сумме произведений соответствующих вероятностей.

Произведя соответствующие расчеты для всех возможных уровней, получим плотность вероятности суммарных колебаний. Причем здесь максимальный возможный уровень не зависит от того, на какую фазу прилива попал в действительности сильнейший нагон, а вероятность наложения считается с учетом различных допустимых состояний. В результате можно получить более реальную оценку экстремальных суммарных уровней, более точную, чем получена по годовым максимумам (рис. 5).

Сравнение результатов расчета экстремальных уровней по годовым максимумам и методом композиции распределений (на рисунке – без учета сильнейшего нагона 1990 года), не дает существенного расхождения, разница

не превышает 5 см. Существенный эффект от нагона 1990 года, выражающийся в резком, примерно на 15 см, возрастании функции распределения, связан с учетом принципиальной возможности наложения сильного нагона на значительный приливной уровень.



**Рис. 5.** Максимальные годовые высоты суммарного уровня в порту Корсакова за 1948–1991 гг., их аппроксимация двойным экспоненциальным распределением (1), распределение экстремальных подъемов уровня, рассчитанное методом композиции распределений гистограммой неприливных колебаний за 1977–1988 гг. (2) и та же характеристика с гистограммой за 1977–1990 гг., включающая сильнейший нагон 10–11 ноября 1990 г. (3)

2

Методика была применена также к расчету экстремальных высот суммарного уровня для морских нефтегазоносных площадей на северо-восточном шельфе о. Сахалин, а также вероятных мест выхода трубопроводов на берег. Сравнение неперiodических колебаний на стационарном береговом самописце уровня в зал. Набилы, а также на временных береговых и морских постах показало почти полную их идентичность. По крайней мере, пространственная изменчивость метеорологических вариаций намного меньше, чем у приливных. Поэтому для расчета экстремальных колебаний уровня моря на нефтегазоносных площадях северо-восточного шельфа о. Сахалин использовалась гистограмма 16-летнего ряда неперiodических колебаний на береговом мареографе. В то же время функции распределения приливных колебаний определялись путем предвычисления на основе гармонических постоянных, рассчитанных по месячным сериям измерений на каждой площади отдельно. Результаты расчетов приведены в табл. 3. В данном случае различия в расчетных суммарных высотах уровня редкой повторяемости обусловлены исключительно пространственной изменчивостью характера и величины приливов, которые на северо-восточном шельфе о. Сахалин очень велики. Величина приливов в направлении с севера на юг сначала плавно возрастала от Одоптинской площади до Чайчинской, затем резко уменьшилась к расположенной в южной части нефтегазоносного района Лунской площади.

**Таблица 3**

Расчетные высоты суммарного уровня редкой повторяемости (в скобках указаны их доверительные 68-процентные интервалы), в сантиметрах, для нефтегазоносных площадей северо-восточного шельфа о. Сахалин

Станция	Период повторяемости, годы		
	25	50	100
Одоптинчкая	170	175	179
Пильтун-Астохская	173	177	181
Чайвинская	177	182	186
Лунская	141	144	148

### **Заключение**

Исследование статистических свойств штормовых нагонов как последовательности случайных событий показывает, что они согласуются с Пуассоновским потоком начиная с некоторого порогового значения на большинстве станций с 40 см, но на некоторых с более высоких значений. Рассмотрены некоторые аспекты методики определения экстремальных высот нагонных подъемов уровня. Наиболее вероятно, эмпирические распределения годовых максимумов непериодической компоненты уровня подчиняются третьему предельному распределению, но из-за малой продолжительности наблюдений чаще всего применяется первое предельное распределение (линейная зависимость). Приведены рассчитанные значения высот штормовых нагонов редкой повторяемости для стационарных береговых самописцев уровня Сахалинского управления Росгидромета. Показано, что полученные оценки могут быть распространены на прилегающие участки побережья путем численного моделирования. Рассмотрен вопрос об оценке вероятности наложения нагона на прилив и расчете экстремальных высот суммарного нагона методом композиции распределений, которая применена к нефтегазоносным площадям северо-восточного шельфа о. Сахалин. Из-за сильной пространственной изменчивости величины приливов полученные оценки сильно различаются – максимальные высоты получены для Чайвинской, минимальные – для Лунской площади.

### **Литература**

1. Герман В. Х. Исследование и расчет вероятностных характеристик экстремальных уровней моря // Труды ГОИН. – 1971. – Вып. 107. – 150 с.
2. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 231 с.
3. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 450 с.
4. Като Э., Миськов О. А., Шевченко Г. В. Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 160–176.



5. Като Э., Любичкий Ю. В., Шевченко Г. В. Расчет экстремальных значений сгонно-нагонных колебаний уровня моря на юго-восточном побережье о. Сахалин // Колебания уровня в морях. – Российский гидрометеорологический университет. – СПб.: Гидрометеоздат, 2003. – С. 111–128.
6. Като Э., Любичкий Ю. В., Шевченко Г. В. Расчет высот штормовых нагонов редкой повторяемости для побережья залива Анива // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – С. 49–57.
7. Любичкий Ю. В. Расчет штормовых нагонов на юго-восточном побережье острова Сахалин // Метеорология и гидрология. – 1983. – № 10. – С. 73–79.
8. Храмушин В. Н., Шевченко Г. В. Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. – 1994. – Т. 34. – № 2. – С. 218–223.
9. Шевченко Г. В., Любичкий Ю. В., Като Э. Проявление штормовых нагонов в Южной части острова Сахалин / ИМГиГ ДВО РАН. – Препр. – Южно-Сахалинск, 1994. – 46 с.
10. Шевченко Г. В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // Изв. РГО. – 1997. – Т. 129. – № 3. – С. 94–107.
11. Шевченко Г. В. Вероятностные оценки риска морских наводнений в порту Корсакова // Цунами и сопутствующие явления. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 91–105.
12. Шевченко Г. В. Штормовые нагоны на Курильских островах // Цунами и сопутствующие явления. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 106–116.
13. Kaistrenko V. M. Probability model of tsunami runup and long-term prediction of tsunami heights // Tsunamis: Treir Science and Hazards Mitigation Proceedings International Tsunami Symposium (July 31 – August 3, 1989). – Novosibirsk, 1990. – P. 249–253.
14. Pugh D. T., Vassie J. M. Extreme sea levels from tide and surge probability // Proc. 16th Coast. Eng. Conf. – Hamburg, 1979. – Vol. 1. – P.911–930.
15. Pugh D. T., Vassie J. M. Tide and surge propagation offshore in the Dowsing region of the North Sea // Deutsche Hydrographische Zetschrift. – 1976. – Heft 5. – P. 445–463.