

УДК 551.465

## ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ПОДЪЕМОВ УРОВНЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОХОТСКОГО МОРЯ ПРИ ЦУНАМИ И ШТОРМОВЫХ НАГОНАХ

© 2017 г. Г. В. Шевченко

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия  
e-mail: g.shevchenko@imgg.ru*

Поступила в редакцию 06.08.2015 г., после доработки 20.10.2015 г.

Проанализированы продолжительные ряды наблюдений за уровнем моря, полученные на 12 береговых самописцах уровня моря на побережье Охотского моря, а также тихоокеанском побережье Курильских островов и Камчатки. Получены оценки максимальных высот приливного уровня, штормовых нагонов и цунами по отдельности, а также расчетные высоты суммарного уровня редкой повторяемости с учетом вероятности суперпозиции отдельных составляющих. Максимальные высоты суммарного уровня без учета цунами получены для станции Магадан, где главным фактором являются аномально большие приливы, а также островов Итуруп и Матуа, на которых зафиксированы наибольшие штормовые нагоны. Минимальные значения получены для Усть-Камчатска и Малокурильского (о. Шикотан) на различных флангах изучаемого района.

При включении в расчет цунами, максимальные значения возможных подъемов уровня наблюдаются на тихоокеанском побережье Курильской гряды, влияние приливов и непериодических вариаций здесь мало. На восточном побережье Камчатки, благодаря закрытости рассматриваемых акваторий, роль цунами существенно меньше. На станции Курильск, где высота наибольшего цунами (Чилийское, май 1960 г.) была вдвое меньше самого сильного нагона, включение цунами вообще не сказывается на результирующих оценках. На других станциях на побережье Охотского моря роль цунами становится значимой, как правило, на периодах повторяемости более 100 лет.

DOI: 10.7868/S0030157417050033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Приливные колебания на побережье Дальневосточного региона России имеют значительную величину (максимальный размах приливных колебаний варьирует от 1.8 м на Южных до 2.3 м на Северных Курильских островах) и достигают максимальных значений в северной части Охотского моря [3, 13]. Соответственно, даже при достаточно опасном цунами прилив может как существенно усилить, так и ослабить воздействие волн на побережье (особенно существенна его роль при событиях умеренной интенсивности). Еще более важен учет влияния прилива при штормовых нагонах, наибольшие из которых вызывают в изучаемом районе подъемы уровня высотой 1–2 м [8]. Поэтому в практике работы дальневосточных подразделений Росгидромета, ответственных за прогноз опасных морских явлений, всегда учитывается, на какую фазу прилива ожидается приход цунами или формирование нагона – это обстоятельство может существенно сказаться на характере развития опасной ситуации и воздействии волн на береговые объекты и сооружения.

Ситуация осложняется в тех случаях, когда сильное землетрясение возбуждает мощные продолжительные колебания, как это было, например, при недавних Чилийском (27 февраля 2010 г.) и Тохоку (11 марта 2011 г.) цунами [17, 18]. В этих случаях оценить влияние прилива достаточно сложно. В частности, первое из них подошло к берегам Камчатки и Курильских островов на момент полной воды прилива, что было одной из причин объявления тревоги цунами. Но первые волны были слабыми, а максимальные, пришедшие через несколько часов, были ослаблены приливом (более подробно эта ситуация обсуждается ниже).

Известно, что самое катастрофическое на российском побережье Дальнего Востока Камчатское цунами 5 ноября 1952 г. пришлось на момент полной воды прилива, который усилил и без того страшный удар стихии [10]. Воздействие на прибрежные населенные пункты Шикотанского цунами 5 октября 1994 г., наиболее опасного на Южных Курильских островах, также было усилено приливом [6]. Напротив, при Чилийском цунами 22 мая 1960 г., которое, несмотря на удаленность источника, представляло



**Рис. 1.** Карта изучаемого района. Показаны береговые мареографные станции, для которых производились расчеты экстремальных высот уровня моря.

серьезную угрозу для населенных пунктов на побережье Курильской гряды и Охотского моря, максимальные волны на большинстве станций пришлись на отлив [14, 19], что снизило его негативное воздействие на объекты береговой инфраструктуры.

**Таблица 1.** Сведения о продолжительности использованных рядов наблюдений

Станция	Продолжительность наблюдений, лет	Период наблюдений
Буревестник	21	1964–1984
Курильск	30	1969–1998
Матуа	23	1960–1982
Северо-Курильск	23	1967–1989
Южно-Курильск	41	1958–1998
Малокурильское	43	1970–2013
Магадан	12	1977–1988
Зал. Набиль	16	1960–1964, 1987–1997
Поронайск	39	1965–1998
Корсаков	44	1948–1992
Петропавловск-Камчатский	12	1977–1988
Усть-Камчатск	12	1977–1988

Оценки вероятного влияния прилива на формирование экстремальных подъемов уровня при цунами или опасных нагонах очень важны с точки зрения не только оперативного, но и долгосрочного прогноза (расчета возможных подъемов уровня редкой повторяемости). При оценках опасности цунами этот фактор обычно не учитывается [7]. В данной работе подобные расчеты выполнялись для 12 мареографных станций на тихоокеанском побережье Курильской гряды и полуострова Камчатка, а также Охотского моря (их положение показано на рис. 1, сведения о продолжительности наблюдений приведены в табл. 1). Оценки были получены методом композиции распределений, учитывающем вероятность наложения различных составляющих вне зависимости от того, наблюдалось ли в действительности наложение цунами или наиболее сильных нагонов на прилив [12, 16, 19]. Ниже рассмотрены некоторые аспекты этой методики, недостаточно освещенные в указанных работах, касающиеся, прежде всего, включения в расчет волн цунами и построения соответствующей функции плотности вероятности. Значительное внимание уделено также оценке того, какое конкретное влияние оказал прилив при формировании наиболее опасных ситуаций, имевших место в прошлом.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЛИВОВ НА ТИХООКЕАНСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

Приливы в рассматриваемом районе хорошо изучены, пространственные распределения амплитуд и фаз основных приливных волн анализировались Р.А. Деевой по материалам постоянных и временных береговых уровенных постов [11], а в открытом море – по данным спутниковых альтиметрических съемок [13]. На побережье Курильской гряды и большей части Охотского моря приливы имеют неправильный суточный характер (лишь в северной и северо-западной его частях доминируют полусуточные приливы), а для районов с преобладанием суточных приливов характерна выраженная межгодовая и внутригодовая изменчивость [5]. Для оценки характера межгодовых вариаций были предвычислены приливные ряды на период с 2000 по 2101 гг., изменчивость максимальных годовых значений приливного уровня (отрицательные отклонения для поставленной задачи менее важны) представлены на рис. 2. Эти вариации, за исключение станции Магадан (здесь приливы очень велики, имеют полусуточный характер с выраженной циклическостью с периодом 4.4 года), имеют значимые колебания с периодом 18.6 года. Интервал с 2004 по 2009 гг. был периодом “больших приливов”, следующий будет в 2023–2028 гг. С этой точки зрения 2010 и 2011 гг., когда на тихоокеанском побережье России наблюдались опасные Чилийское (27 февраля 2010 г.) и Тохоку (11 марта 2011 г.) цунами, можно отнести к годам со “средними приливами”. Внутригодовая изменчивость заключается в увеличении приливных колебаний в дни летнего и зимнего солнцестояний и уменьшении на дни весеннего и осеннего равноденствий. Рассматриваемые цунами пришлись на период сезонного уменьшения приливных колебаний. Для суточных приливов большую роль играют также полумесячные неравенства приливов, и рассматриваемые цунами совпали со временем интенсивных приливных вариаций. Также отметим определенную асимметрию между приливами и отливами – первые значительно меньше по величине, но наблюдаются в течение более продолжительных интервалов времени.

Для оценки вероятного влияния прилива на формирование опасных ситуаций необходимо рассчитать гистограмму 19-летнего приливного ряда, которая хорошо аппроксимирует плотность вероятности приливных колебаний (в набор гармонических постоянных основных приливных волн были включены годовая и полугодовая составляющие  $Sa$  и  $Ssa$  для учета сезонных вариаций) [15, 16, 19]. На рис. 3 представлены

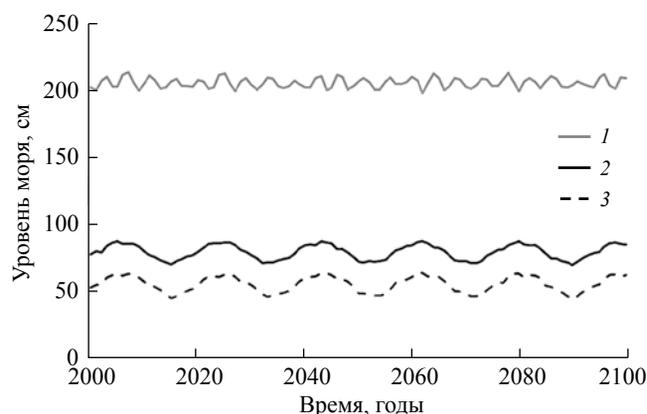


Рис. 2. Вариации годовых максимальных значений приливного уровня по результатам предвычисления на 2000–2100 гг. для станций Магадан (1), Северо-Курильск (2) и Набиль (3).

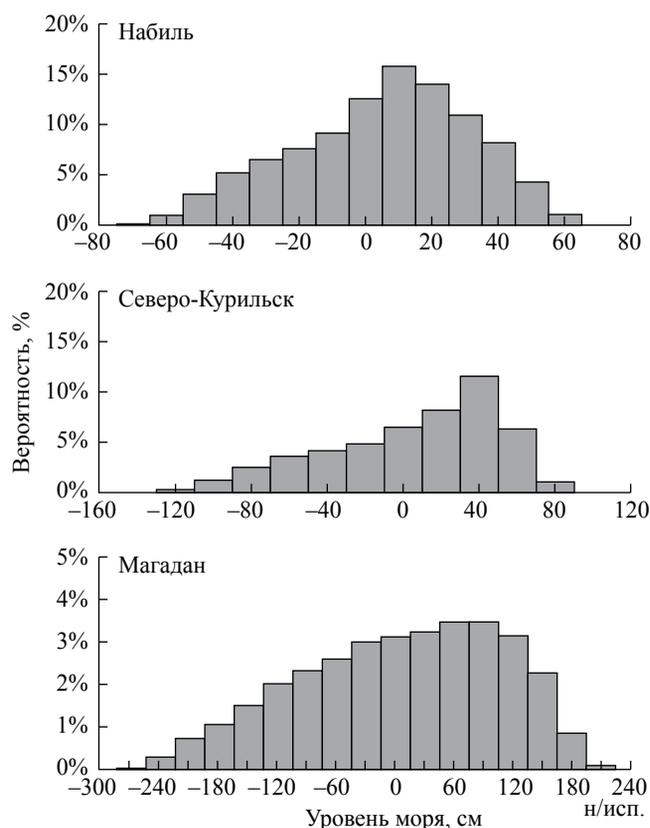
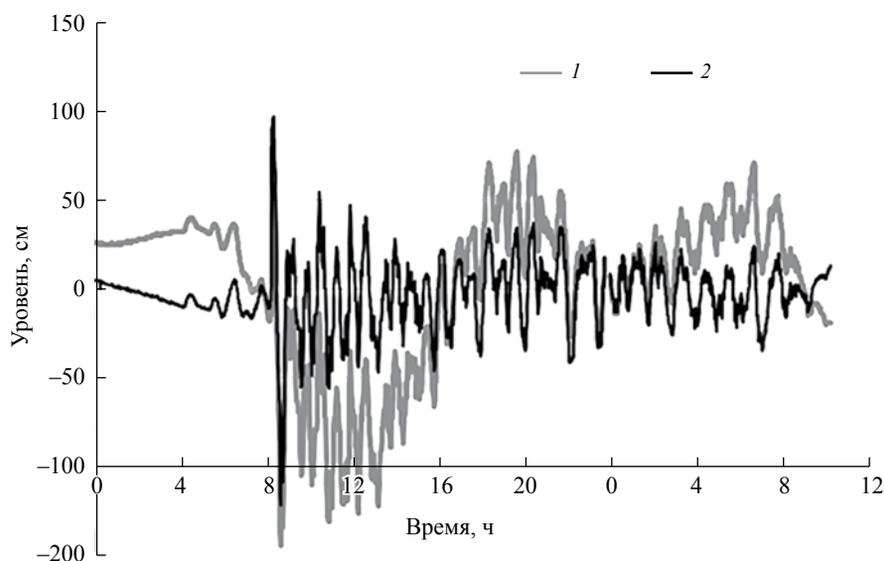


Рис. 3. Гистограмма предвычисленного приливного ряда за период 2000–2018 гг. для станций Набиль, Северо-Курильск и Магадан.

гистограммы, полученные для мареографных станций Набиль (правильный суточный прилив), Северо-Курильск (неправильный суточный) и Магадан (неправильный полусуточный). На всех остальных мареографах характер прилива смешанный, с некоторым преобладанием суточных



**Рис. 4.** Записи колебаний уровня в порту Северо-Курильск (о.Парамушир) за 28.02–01.03.2010 г., содержащие Чилийское цунами – с приливом (2) и без прилива (1).

волн, характер распределения близок к полученному для Северо-Курильска. Преобладание суточных или полусуточных волн определяет особенности распределения приливных колебаний по грациям высоты. В частности, значительная роль суточных приливов на большинстве анализируемых станций определяет одномодальную структуру гистограмм и их явную асимметрию – положительные отклонения приливных вариаций от нулевого среднего меньше по величине, чем отрицательные, но имеют более высокую повторяемость. Подобной картины не наблюдается в Северном море, где главную роль играет полусуточная гармоника M2, и распределение приливных колебаний симметрично и двухмодально [15]. Но с точки зрения решаемой задачи эти особенности не являются существенными.

### 3. НАЛОЖЕНИЕ ЦУНАМИ НА ПРИЛИВ

Так как характер наложения наиболее сильных цунами, имевших место в прошлом, уже обсуждался выше, рассмотрим сравнительно недавние события – Чилийское (27 февраля 2010 г.) и Тохоку (11 марта 2011 г.) цунами, которые представляли опасность для населенных пунктов на тихоокеанском побережье России (высоты волн составляли около 2 и 2.5–3 м при указанных событиях, была объявлена тревога цунами).

**3.1. Чилийское цунами 27 февраля 2010 г.** Первые волны при Чилийском цунами подошли к берегам Камчатки и Курильских островов в момент высокой воды прилива. В течение суток 28 февраля отмечено два максимума – около 4 и 19 часов

высотой около 40 см, и один выраженный минимум около –80 см в 12 часов UTC. Однако первые волны не имели большой высоты (за исключением бухты Церковная на океанском побережье о. Шикотан [17]), волны с максимальной амплитудой пришлось на спадание уровня, а в некоторых пунктах (например, бухта Малокурильская) – на отрицательные значения приливного уровня относительно нулевого среднего. Поэтому прилив лишь в некоторых пунктах (где на начальном отрезке были волны значительной высоты) усилил цунами, в других (Северо-Курильск, Водопадная) его влияние было незначительным, в ряде пунктов воздействие цунами было ослаблено. Максимальная на всем тихоокеанском побережье России волна в Северо-Курильске (218 см от подошвы до гребня, положительное отклонение от нулевого среднего уровня достигло 97 см, отрицательное –121 см) пришлось на небольшой по величине отрицательное значение прилива (рис. 4). Максимальное значение суммарного уровня составило 86 см. Наибольшее отрицательное отклонение суммарного уровня составило –144 см, то есть прилив ослабил накат цунами, и усилил откат. В целом это ослабило негативный эффект от воздействия волны, так как от наката цунами страдают практически все объекты, находящиеся в береговой зоне, а от отката – лишь немногие портовые сооружения, доки и морские водозаборы. При нынешнем состоянии экономики Северо-Курильска это усиление отката не имело заметных негативных последствий. Отметим, что первая, достаточно слабая волна, была зафиксирована в этом пункте практически в момент полной воды прилива, и если бы она имела

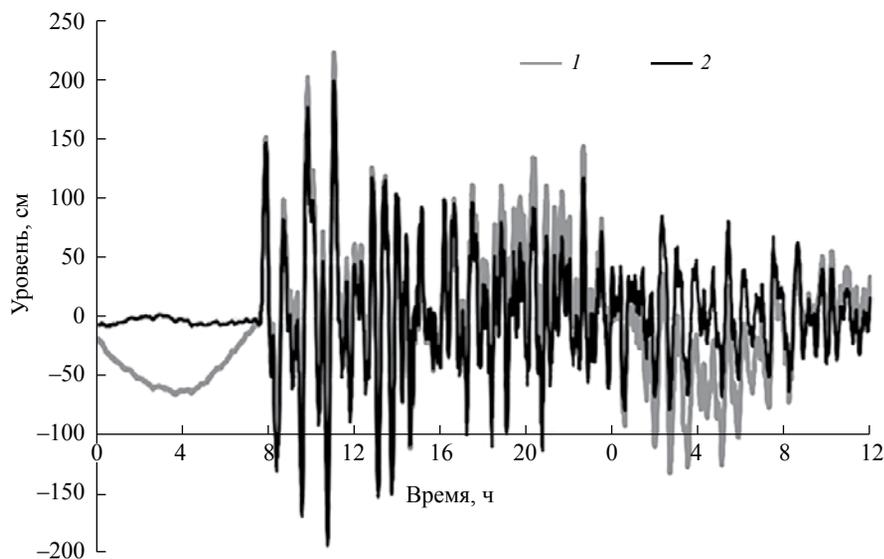


Рис. 5. Записи колебаний уровня на станции Южно-Курильск (о. Кунашир) за 11–12.03.2011 г., содержащие Тохоку цунами – с приливом (2) и без прилива (1).

значительную высоту, то последствия для порта могли быть весьма серьезными.

На побережье о. Сахалин (станции Корсаков, Поронайск) наиболее интенсивные колебания, связанные с Чилийским цунами, также пришлось на спадание уровня или малую воду прилива.

**3.2. Тохоку цунами 11 марта 2011 г.** Приход максимальных волн Тохоку цунами к берегам Курильских островов пришелся на малую полную воду прилива. В течение суток 11 марта на тихоокеанском побережье России был отмечен хорошо выраженный минимум (–70 см около 4 часов утра), и два максимума: первый, сравнительно слабый, высотой 20–25 см, около 12:30, и второй, более значительный, высотой 45 см, около 20 часов UTC. Первые волны на станции Южно-Курильск (о. Кунашир) пришлось на небольшие по величине положительные отклонения приливного уровня (рис. 5), а на станции Семячки, на которой отмечены наибольшие волны на восточном побережье Камчатки [18], непосредственно на первый максимум. Максимальная волна на последней станции не была зарегистрирована из-за аппаратных сбоев, но она пришла лишь немного ранее второго, основного максимума приливного уровня. Таким образом, прилив в определенной мере усилил воздействие цунами на побережье на Южных Курильских островах, и более существенно – на Северных Курилах и тихоокеанском побережье Камчатки. Вероятно, именно это обстоятельство способствовало интенсивному взлому льда в бухтах и устьях рек, что было главной особенностью проявления этого цунами на тихоокеанском побережье России.

#### 4. ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ И ПРИЛИВ

Рассмотрим, какое влияние на формирование подъемов суммарного уровня оказал прилив при экстремальных нагонах на различных станциях.

**4.1. Штормовой нагон 4 декабря 1971 г. в г. Курильск.** Курильск находится на берегу зал. Китовый, расположенном на охотоморском побережье о. Итуруп. Штормовые нагоны здесь формируются достаточно часто при выходе циклонов в южную или центральную часть Охотского моря, где скорость их перемещения обычно заметно снижается, при ветрах западного и юго-западного румбов. Рассматриваемый штормовой нагон был самым сильным на всех анализируемых станциях



Рис. 6. Графики вариаций суммарного уровня (1), непериодической (2) и приливной компонент (3) по измерениям на станции Курильск за 29.11–6.12.1971 г.

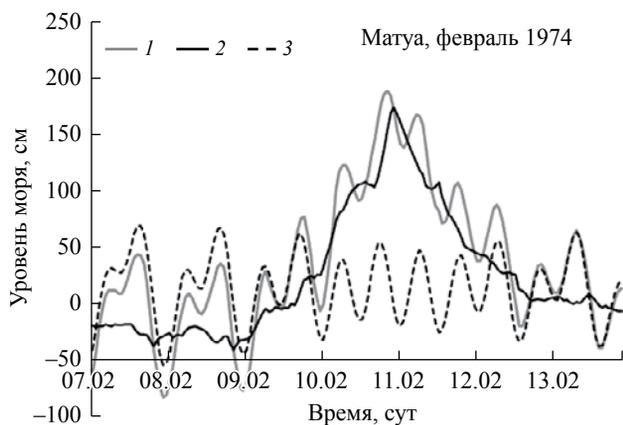


Рис. 7. Графики вариаций суммарного уровня (1), непериодической (2) и приливной компонент (3) по измерениям на станции Матуа за 7–13.02.1974 г.

за многолетний период наблюдений, его высота составила 204.5 см (рис. 6), более сильные нагоны в Дальневосточном регионе России зафиксированы только в Сахалинском заливе [8]. Это значение пришлось на отрицательное отклонение приливного уровня (–42 см), то есть суммарный уровень в момент нагона был существенно ослаблен, его высота составила 412 см над нулем поста (162 см относительно нулевого среднего уровня). Максимальный уровень (200 см) был зафиксирован четырьмя часами ранее при приливном уровне 51 и нагонном – 149 см.

**4.2. Штормовой нагон 10–12 февраля 1974 г. на о. Матуа.** Остров Матуа имеет небольшие размеры, и прилегающий к нему шельф достаточно короткий и приглубый, поэтому физические причины формирования здесь целого ряда сильных штормовых нагонов (за 23-летний период наблюдений зафиксировано 11 нагонов с высотой подъема уровня более 1 м, 2 из них были более 1.5 м), остаются неясными. В этом смысле самое сильное событие на этом острове, имевшее место 10–12 февраля 1974 г., особенно удивительно как высотой (максимум 175 см относительно нулевого среднего уровня), так и продолжительностью – подъем уровня более 1 м наблюдался около 30 часов, что бывает, как правило, только в вершинах мелководных заливов (рис. 7).

Экстремальный нагон пришелся на период ослабления приливов в рамках выраженного на Курильских островах полумесячного цикла, поэтому их вклад был сравнительно невелик. Максимум нагона пришелся на начало отлива (–16 см), величина суммарного уровня составила 288 см над нулем поста (172 см над нулевым средним уровнем). Наибольший подъем суммарного уровня (305 см над нулем поста) был зафиксирован

двумя часами ранее при приливе 19 см и нагоне 156 см.

**4.3. Штормовой нагон в Буревестнике 22 марта 1984 г.** Портпункт Буревестник находится на берегу зал. Касатка, расположенном на тихоокеанской стороне о. Итуруп. Штормовые нагоны формируются здесь при положении центра циклона к востоку от Южных Курильских островов, при ветрах северо-восточного и восточного румбов. При экстремальном нагоне 22 марта 1984 г. подъем уровня высотой более 1 м продолжался более 9 часов. Максимальное значение нагонной волны 137 см пришлось на начало отлива (–13 см), максимальный подъем суммарного уровня (156 см относительно нулевого среднего) отмечен четырьмя часами раньше при приливе 48 и нагоне 108 см.

**4.4. Штормовой нагон 4–5 мая 1987 г. в бухте Нагаева (Магадан).** Бухта Нагаева вытянута в зональном направлении и на 16 км вдается в полуостров Старицкого. Это одна из наиболее защищенных бухт в Дальневосточном регионе России, вход в нее открыт только с западной стороны, поэтому штормовые нагоны и сильное волнение наблюдаются здесь редко. Вопрос о сочетании нагона и прилива на станции Магадан интересен прежде всего потому, что величина прилива здесь намного больше, чем на остальных станциях (размах колебаний около 5 м).

Однако наибольший за анализируемый период наблюдений штормовой нагон (максимальная высота 81 см), имевший место 4–5 мая 1984 г., пришелся на квадратурный прилив. Тем не менее, усиление нагона было весьма существенным – максимум пришелся на прилив высотой 91 см, а наибольший подъем суммарного уровня сформировался часом раньше при приливе 107 см и нагоне 79 см. Следует отметить весьма плавное изменение нагонной волны, подъем более полуметра продолжался в течение 20 часов.

**4.5. Штормовой нагон 7 октября 2006 г. в бухте Малокурильская.** Бухта Малокурильская имеет грушевидную форму и своим узким входом обращена к Южно-Курильскому проливу, от ветров нагонных направлений она прикрыта островами Кунашир и Итуруп. Таким образом, топографические условия не способствуют формированию здесь сильных штормовых нагонов. Не случайно здесь отмечена одна из самых низких высот максимального нагона среди всех станций, составившая 62 см за 29 лет наблюдений.

Однако 7 октября 2006 г. был зафиксирован значительно более сильный нагон (75 см, с учетом вклада сейши – 114 см), который пришелся на полную воду прилива (36 см). В результате отмечен экстремальный подъем суммарного уровня

(340 см над нулем поста, или 150 см над нулевым средним), который оказался даже выше, чем при цунами 11 марта 2011 г. [1].

Приведенные примеры показывают, что существенное усиление цунами или нагона за счет прилива наблюдается сравнительно редко, но в этих случаях негативное воздействие морских опасных явлений на побережье и объекты, расположенные в прибрежной зоне, резко возрастает. Это подчеркивает важность объективной оценки вероятности подобных наложений при экстремальных ситуациях.

## 5. МЕТОД КОМПОЗИЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Предложенный английскими учеными [15] метод композиции распределений приливной и непериодической составляющих уровня был обобщен путем включения цунами и основан на представлении уровня в любой момент времени  $t$  в виде линейной комбинации отдельных составляющих [16]:

$$\zeta(t) = \zeta_0 + \zeta_t + \zeta_s + \zeta_m + \zeta_{ts}, \quad (1)$$

где  $\zeta_0$  – средний уровень,  $\zeta_t$  – приливная компонента,  $\zeta_s$  – сезонные вариации, которые из-за их квазистационарного характера обычно объединяют с приливами,  $\zeta_m$  – непериодические вариации метеорологической природы,  $\zeta_{ts}$  – волны цунами, которые дают вклад очень редко. Тогда плотность вероятности колебаний суммарного уровня можно оценить по формуле [16]:

$$P_\zeta(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_1(x_1) \int_{-\infty}^{+\infty} P_2(x_2) \dots \int_{-\infty}^{+\infty} P_{N-1}(x_{N-1}) P_N(y - x_1 - x_2 - \dots - x_{N-1}) dx_1 dx_2 \dots dx_{N-1}, \quad (2)$$

где  $P_i$  – плотности вероятности отдельных компонент.

Вероятность превысить некоторое значение  $h$  (функции обеспеченности, учитывающую все возможные комбинации уровня вне зависимости от того, имели они место на практике, или нет) можно определить по формуле

$$F(h) = \int_h^\infty P_\zeta(y) dy. \quad (3)$$

Соответствующий этому значению период повторяемости  $T$  определяется стандартным образом:

$$T(h) = \frac{1}{nF(h)}, \quad (4)$$

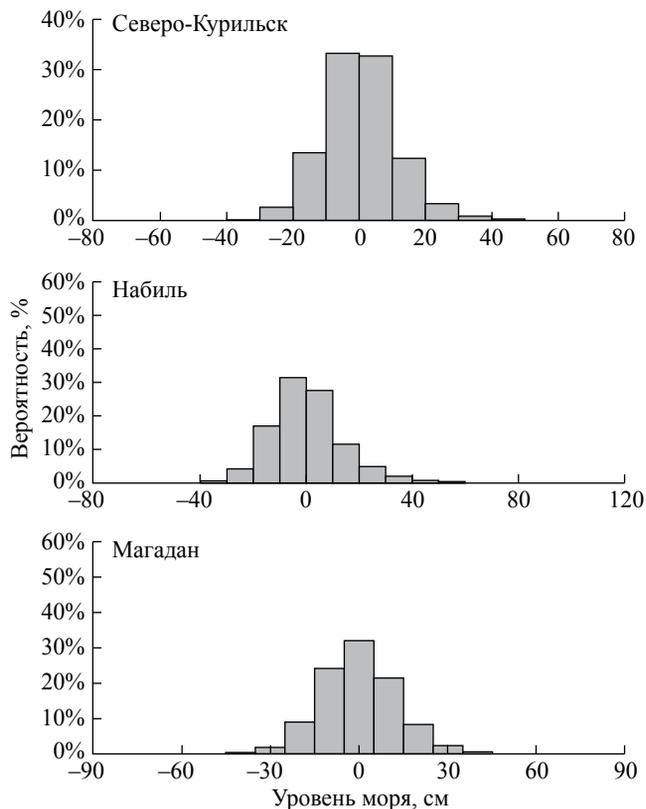


Рис. 8. Гистограммы непериодических колебаний уровня моря за анализируемый период времени на станциях Северо-Курильск, Набиль и Магадан.

где  $n = 8766$  – среднее число часовых отсчетов в году. Основные моменты метода хорошо известны [2, 15, 16, 20]. Плотность вероятности приливных колебаний, как отмечено выше, описывается гистограммой предвычисленного 19-летнего ряда. Для аппроксимации функции плотности вероятности вариаций уровня моря метеорологической природы использовалась гистограмма всего имеющегося ряда непериодических колебаний, полученного путем вычитания из исходных рядов предвычисленного прилива. Опыт показывает, что наиболее подходящей величиной интервала является значение 5 см, но на рис. 8 для наглядности приведена гистограмма с шагом 10 см.

Эти функции, в отличие от приливной компоненты, имеют значительное сходство с нормальным распределением, но характеризуются существенно более “тяжелыми хвостами”, причем правый хвост значительно тяжелее, так как в изучаемом регионе нагоны гораздо больше сгонов.

Имеются некоторые тонкости, связанные с аппроксимацией плотности вероятности метеорологических колебаний в области больших периодов повторяемости. Tawn [20] рекомендовал использовать параметрическую зависимость в области

**Таблица 2.** Наибольшая высота прилива (положительное отклонение от нулевого среднего уровня), максимальные наблюдавшиеся нагоны и высоты суммарного уровня редкой повторяемости, рассчитанные методом композиции распределений (прилив + нагон)

Станция	Максим. прилив, см	Максим. нагон, см	Период повторяемости, лет		
			50	100	200
Буревестник	63.4	130.6	178	183	187
Курильск	68.7	204.5	228	238	246
Магуга	70.2	166.5	213	218	223
Северо-Курильск	88	68.1	145	148	151
Южно-Курильск	54.3	75.5	114	117	120
Малокурильское	55.8	100*	140	144	147
		61.9	104	107	110
Магадан	213.6	75.2*	112	117	121
		81.2	262	267	271
Зал. Набиль	64.4	87.0	138	141	144
Поронайск	73.7	112.2	157	164	170
Корсаков	80	88.7	135	141	147
Петропавловск-Камчатский	93.8	59.8	136.7	139.5	141.6
Усть-Камчатск	70.2	54.3	112.6	114.6	116.7

\* Высота экстремального нагона 17.12.2014 г. (не вошел в анализируемую выборку).

высоких значений непериодической составляющей, поскольку при коротких рядах наблюдений (менее 10 лет) эмпирическая функция распределения может носить в области малых вероятностей немонокотный характер, что приводит к существенным погрешностям при вычислении свертки (2). Также возможно увеличение расчетных высот суммарного уровня редкой повторяемости, если включить в расчет прогностические значения высоты нагонов малой вероятности (меньшей, чем вероятности максимальных высот, полученные из наблюдений). Кроме того, регистрация существенно более сильного нагона по сравнению с имеющимися в анализируемой выборке, приводит к аналогичному увеличению расчетных высот суммарного уровня. Именно такая ситуация была на станциях Малокурильское и Южно-Курильск, где в анализируемый период не попали экстремальные нагоны 7 октября 2006 г. и 17 декабря 2014 г. (в последнем случае измерения не проводились, экспертная оценка высоты нагона составила 1 м). В табл. 2 приведены расчетные значения с учетом дополнительных сведений, и без их учета, по достаточно продолжительным рядам наблюдений. Эти примеры подчеркивают важность включения в расчет экстраординарных событий, регистрация которых приводит к пересмотру оценок возможных высот редкой повторяемости как собственно нагонных волн, так и суммарного уровня.

В рассматриваемом в данной работе случае наиболее проблематично выглядели сравнительно

короткие 12-летние ряды, имевшиеся в нашем распоряжении на станциях Магадан, Петропавловск-Камчатский и Усть-Камчатск. Как упоминалось выше, расчет статистических характеристик штормовых нагонов по более продолжительным рядам наблюдений на двух последних станциях практически не сказался на величине главного максимума [9]. Функции плотности вероятности в области малых вероятностей были достаточно гладкими на всех уровнях постах, так что расчет экстремальных высот суммарного уровня по схеме прилив+нагон (табл. 2) можно считать корректным и для указанных станций.

Был также протестирован вариант с аппроксимацией распределения непериодических высот уровня редкой повторяемости по стандартной методике статистики экстремальных значений [4]. Однако практически никаких изменений при расчете возможных высот суммарного уровня в рассматриваемом диапазоне периодов повторяемости 25–200 лет выявлено не было, заметный эффект от этого включения проявлялся только на гораздо больших периодах повторяемости, начиная с 400–500 лет.

## 6. УЧЕТ ЦУНАМИ

Наиболее существенным развитием методики, созданной [15] и усовершенствованной [20] английскими учеными, было включение в расчет волн цунами. Цунами очень редкое явление, и задача построения для нее функции плотности

вероятности, аналогичной полученной для приливных и неперриодических колебаний, не является простой. Один из вариантов ее решения был предложен в работах [12, 16], на некоторых его моментах остановимся подробнее.

Число зарегистрированных цунами колебалось от 4 (Набиль, Петропавловск-Камчатский, Усть-Камчатск) до 14 (Южно-Курильск). Преимущественно учитывались высоты, полученные с мареографных лент (использовались только максимальные высоты волн от подошвы до гребня, если они были не менее 10 см). Лишь в немногих случаях привлекались данные о максимальных заплесках, имевших место в районе расположения самописца уровня моря, как правило, при наиболее сильных событиях, в частности, при Камчатском цунами 5 ноября 1922 г. в Северо-Курильске (заплеск около 11 м).

Расчет функции распределения высот цунами проводился методом экстремальной статистики с линейной аппроксимацией зависимости высоты волны от приведенной переменной (показателя  $u$  в двойном экспоненциальном распределении  $\exp(-\exp(-u))$ ) [2, 4]. Пример расчета для станции Магадан приведен на рис. 9, при небольшой выборке линейная функция обычно обеспечивает удовлетворительную аппроксимацию эмпирического распределения. Физически третье, нелинейное распределение Гумбеля [4], отвечающее ограниченности масштаба природных опасных явлений, можно считать более подходящим для оценки вероятности большинства экстремальных ситуаций, однако, по-видимому, имеющиеся ряды наблюдений слишком короткие для его применения. Поэтому при экстраполяции на сравнительно небольшие периоды времени (рассматриваемый в данной работе диапазон 50–200 лет как раз относится к таким) целесообразно применять именно линейную зависимость. Расчетные значения высот цунами редкой повторяемости приведены в табл. 3. На тихоокеанском побережье Курильской гряды максимальные и зафиксированные, и расчетные высоты волн цунами очень велики, особенно в Северо-Курильске. Интересно, что в Петропавловске-Камчатском и Усть-Камчатске, во внутренних акваториях, максимальные высоты при Камчатском цунами 1952 г. были сравнительно невелики (примерно на порядок меньше чем на открытом побережье). Особо подчеркнем, что в Усть-Камчатске, а также на станциях Набиль и Поронайск высоты цунами и максимальных нагонных волн имели примерно одинаковую величину, а в Курильске высота нагона в 1971 г. была вдвое больше наибольшей высоты цунами, зарегистрированной в мае 1960 г.



Рис. 9. Эмпирическое распределение высот волн цунами на станции Магадан и его аппроксимация линейной зависимостью Гумбеля.

Значения функции плотности вероятности цунами определялись как разности значений полученной описанным выше способом функции распределения для высот, отличающихся на 5 см. Расчеты начинались с высоты волны 10 см и проводились до значения, отвечающего периоду повторяемости 1 раз в 500 лет (при расчете высот суммарного уровня до периода повторяемости 200 лет). При этом высоте 0 см приписывалось такое значение вероятности, чтобы сумма всех вероятностей была равна 1. В логарифмическом масштабе плотность вероятности изменяется линейно, за исключением высоты  $h = 0$ , вероятность которого в данном расчете составила 0.999987. Это соответствует редкости данного явления по сравнению с регулярными колебаниями уровня моря.

Построенные таким образом функции использовались при расчете возможных высот экстремальных подъемов уровня с учетом вероятности

Таблица 3. Максимальная высота цунами и высоты цунами редкой повторяемости

Станция	Максим. высота, м	Период повторяемости, лет		
		50	100	200
Буревестник	3.0	3.2	4.0	4.9
Курильск	1.0	0.8	1.1	1.4
Матуа	3.5	4.0	5.3	6.6
Северо-Курильск	11.0	5.9	9.6	13.3
Южно-Курильск	4.6	3.5	4.6	5.7
Малокурильское	4.6	4.2	5.4	6.7
Магадан	2.2	1.8	2.5	3.2
зал. Набиль	0.8	0.8	1.1	1.4
Поронайск	1.3	0.9	1.5	2.1
Корсаков	1.5	1.2	1.6	1.9
Петропавловск-Камчатский	1.2	0.8	1.4	2.0
Усть-Камчатск	0.6	0.4	0.7	1.0

**Таблица 4.** Экстремальные высоты уровня моря, рассчитанные методом композиции распределений (прилив + нагон + цунами)

Станция	Период повторяемости, лет		
	50	100	200
Буревестник	3.4	4.1	4.9
Курильск	2.3	2.4	2.5
Матуа	4.1	5.3	6.6
Северо-Курильск	5.9	9.6	13.3
Южно-Курильск	3.5	4.6	5.7
Малокурильское	4.2	5.4	6.7
Магадан	2.7	2.9	3.4
зал. Набиль	1.4	1.4	1.5
Поронайск	1.6	1.7	2.2
Корсаков	1.4	1.6	2.0
Петропавловск-Камчатский	1.4	1.6	2.1
Усть-Камчатск	1.1	1.2	1.3

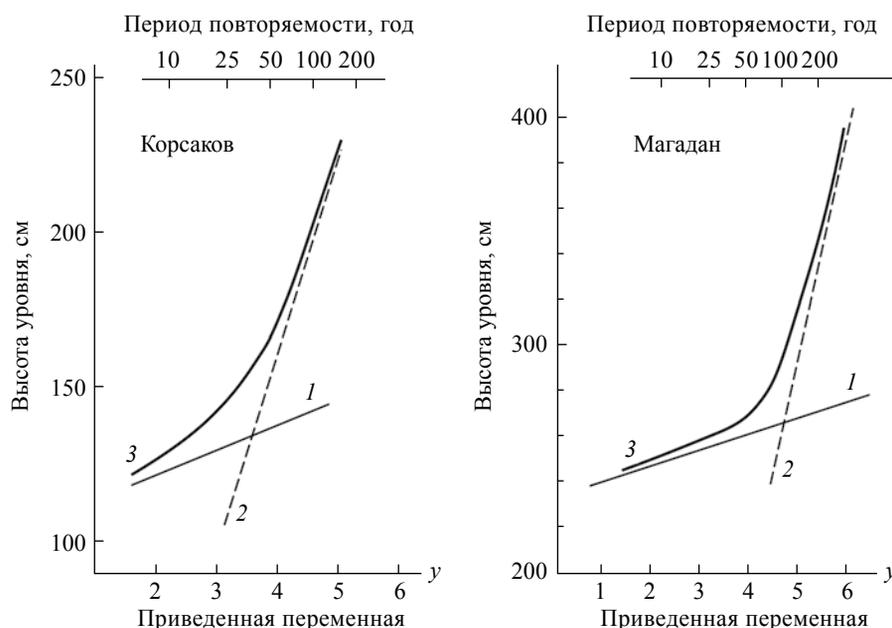
суперпозиции прилива, штормового нагона и цунами. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчет экстремальных высот суммарного уровня без учета цунами (табл. 2) выявил существенную неравномерность их пространственного распределения. Резко выделяется станция Магадан,

где отметка, соответствующая периоду повторяемости 100 лет, превышает 2.5 м. В данном районе нагоны имеют умеренную интенсивность, высокие значения суммарного уровня обусловлены аномально большими приливами. В Курильске и на о. Матуа аналогичные высоты превышают 2 м, а в портпункте Буревестник на океанском побережье о. Итуруп, а также в Поронайске – 1.5 м. На этих станциях главную роль играют штормовые нагоны, достигающие здесь значительной величины. В остальных пунктах наблюдения расчетные высоты суммарного уровня колеблются в пределах от 1 до 1.5 м, наименьшие значения отмечены в бухте Малокурильская (принципиально не изменяет ситуацию учет экстремального события 2006 г.) и эстуарии р. Камчатки.

При учете цунами наибольшие расчетные высоты волн редкой повторяемости получены для океанского побережья Курильской гряды. В тех случаях, когда максимальная высота волны цунами превышала 3 м, влияние приливов и метеорологических вариаций было незначительно и сказывалось только на периодах повторяемости меньше 50 лет. На охотоморском побережье о. Итуруп (станция Курильск) влияние цунами практически не сказывается на итоговых оценках возможных подъемов уровня моря, так как наиболее опасные ситуации связаны со штормовыми нагонами. Близкая ситуация на тихоокеанском побережье полуострова Камчатка (в эстуарии р. Камчатки), а также в зал. Набиль на северо-восточном



**Рис. 10.** Распределение экстремальных высот суммарного уровня по схеме нагон + прилив (1), распределение высот волн цунами (2), а также общая оценка риска наводнений в портах Корсакова и Магадана с учетом трех составляющих (3). По горизонтальной оси отложена приведенная переменная

побережье о. Сахалин. Внутри бухты Авачинская губа (Петропавловск-Камчатский), на юго-восточном побережье о. Сахалин и на станции Магадан роль цунами значительна и она увеличивается с ростом периода повторяемости. Этот факт хорошо иллюстрирует рис. 10, из которого хорошо видно, что функция распределения высот цунами пересекает линию, отвечающую расчету по схеме прилив + нагон, на периодах повторяемости 50–100 лет. На периодах повторяемости, лежащих справа от точки пересечения, роль цунами в расчете по схеме прилив+нагон+цунами становится преобладающей.

Особенно интересна станция Магадан. С одной стороны, здесь очень велики приливы, и расчетная высота суммарного уровня без учета цунами здесь была наибольшей среди всех пунктов наблюдения. С другой стороны, здесь отмечены наибольшие значения высот волн цунами среди всех станций на побережье Охотского моря, увеличение их роли начинается с периода повторяемости около 100 лет, при меньших значениях влияние цунами незначительно.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод композиции распределений применен к расчету экстремальных высот уровня моря на побережье Курильских островов, полуострова Камчатка и Охотского моря. Каждая из компонент (приливы, объединенные с сезонными вариациями, штормовые нагоны и цунами) были исследованы по отдельности, после чего были рассчитаны возможные подъемы суммарного уровня в комбинациях прилив+нагон и прилив+нагон+цунами.

Максимальные приливы (размах около 5 м, положительное отклонение от среднего уровня более 2 м) отмечены в северной части Охотского моря (Магадан), наименьшие – на южном фланге Курильской гряды (Малокурильское, Южно-Курильск).

Штормовые нагоны наиболее опасны на островах Итуруп (Курильск, Буревестник) и Маута, и наименее интенсивны на восточном побережье полуострова Камчатка (Петропавловск-Камчатский, Усть-Камчатск). Расчетные высоты суммарного уровня редкой повторяемости (без учета цунами) максимальны на станции Магадан за счет аномально больших приливов и на островах Итуруп и Матуа за счет большой величины нагонов.

При включении в расчет цунами, максимальные значения возможных подъемов уровня наблюдаются на тихоокеанском побережье Курильской гряды, влияние приливов и непериодических вариаций здесь мало. На восточном побережье Камчатки, благодаря закрытости

рассматриваемых акваторий, роль цунами существенно меньше, особенно в Усть-Камчатске. На станции Курильск, где высота наибольшего цунами (Чилийское, май 1960 г.) была вдвое меньше самого сильного нагона, включение цунами вообще не сказывается на результирующих оценках. На других станциях на побережье Охотского моря роль цунами становится значимой, как правило, на периодах повторяемости более 100 лет.

В целом, метод композиции распределений позволяет рассчитывать возможные высоты суммарного уровня с учетом вероятности суперпозиции различных составляющих, в том числе возможности наложения цунами на прилив или штормовой нагон. Это весьма существенно для побережья Охотского моря, а также для достаточно закрытых заливов и бухт на тихоокеанском побережье Дальнего Востока России. Подобные оценки очень важны для объектов высокой степени ответственности, повреждение или разрушение которых может привести к серьезным экологическим последствиям – таким как атомные электростанции с охладительными системами, основанными на использовании морской воды, объекты добычи и транспортировки нефти и природного газа на шельфе, нефтеналивных портов и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00936).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганзей Л.А., Разжигайева Н.Г., Харламов А.А., Ивельская Т.Н. Экстремальные шторма 2006–2007 гг. на о. Шикотан: воздействие на прибрежный рельеф и осадки // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 3. С. 458–467.
2. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 231 с.
3. Гидрология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 342 с.
4. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
5. Дуванин А.И. Приливы в море. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 390 с.
6. Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А. и др. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // *Докл. РАН*. 1996. Т. 348. № 4. С. 532–538.
7. Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Томсон Р.Е. К вопросу о долгосрочном прогнозе цунами (на примере побережья Перу и Северного Чили) // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 4. С. 544–556.

8. *Любичкий Ю.В., Шевченко Г.В., Елисов В.В.* Штормовые нагоны // *Мировой океан. Т. 1: Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане* / Ред. Лобковский Л.И. М.: Научный мир, 2013. С. 559–575.
9. *Любичкий Ю.В.* Штормовые нагоны на восточном побережье полуострова Камчатка // *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Всероссийская научная конференция с международным участием, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.: сборник материалов. В 2-х томах* / Под ред. Левина Б.В. и др. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 341–344.
10. *Рабинович А.Б., Скрипник А.В.* Учет приливных и метеорологических колебаний уровня океана при оценке цунамиопасности в районе Северо-Курильска // *Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курильских островов*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 107–117.
11. *Таблицы приливов. Воды азиатской части СССР и прилегающих зарубежных районов.* Л.: Гидрометеиздат, 1960. 192 с.
12. *Шевченко Г.В., Файн А.В., Рабинович А.Б., Мансуров Р.Н.* Оценка экстремальных колебаний уровня моря в районе устья реки Тымь // *Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе*. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. С. 253–276.
13. *Шевченко Г.В., Романов А.А.* Определение характеристик прилива в Охотском море по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2004. № 1. С. 49–62.
14. *Щетников Н.А.* Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952–1968 гг. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 165 с.
15. *Pugh D.T., Vassie J.M.* Extreme sea levels from tide and surge probability // *Proc. 16th Coast. Eng. Conf. Hamburg*. 1979. V. 1. P. 911–930.
16. *Rabinovich A.B., Shevchenko G.V., Sokolova S.E.* An estimation of extreme sea levels in the northern part of the Sea of Japan // *La mer*. 1992. V. 30. P. 179–190.
17. *Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A., Shishkin A.* The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia // *Pure Appl. Geophys.* 2013. V. 170. P. 1511–1527.
18. *Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A.* Characteristics of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Russian Far East Coast: Deep-water and coastal observations // *Pure and Applied Geophys.* 2014. V. 171. P. 3329–3350.
19. *Shevchenko G., Ivelskaya T.* Estimation of extreme sea levels for the Russian coasts of the Kuril Islands and the Sea of Okhotsk // *Pure and Applied Geophys.*— 2015. Springer Basel (DOI 10.1007/s00024-015-1077-y).
20. *Tawn J.A.* Estimating probabilities of extreme sea levels // *Journal of the Royal statistical society. Series C (Applied statistics)*. 1992. V. 41. № 1. P. 77–93.

## On the Influence of the Tide on the Formation of Dangerous Level Rises on the Coast of the Sea of Okhotsk and Adjacent Areas in the Cases of Tsunami and Storm Surges

G. V. Shevchenko

The long sea level series recorded at the 12 coastal tide gauges which located on the coast of the Sea of Okhotsk and the Pacific coast of the Kuril Islands and Kamchatka were analysed. Estimations of the maximum heights of the tidal level, storm surges and tsunamis were obtained individually, as well as the estimated rare recurrence of total sea level height with the probability of superposition of these individual components. The maximum total height of the sea level without the tsunami were obtained for the Magadan station, where the main factor is anomalously large tides, as well as for Iturup and Matua islands, where the highest storm surges were recorded. The minimum values obtained for the Ust-Kamchatsk and Malokurilsk (Shikotan I.) on different flanks of the study area.

When tsunami included, the maximum values of possible total sea level rises were observed on the Pacific coast of the Kuril ridge, the influence of tides and meteorologically-induced oscillations are small. On the east coast of Kamchatka, thereby to the considered closed area, the role of the tsunami is much smaller. The station Kurilsk, where the height of the largest tsunamis (Chilean, May 1960) was about a half the strongest surge height, including of the tsunami did not affect the resulting estimates. At other stations on the coast of the Sea of Okhotsk becomes a significant role tsunami, as a rule, at the return periods of 100 years.