

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.466.6

А.А. Иванова¹, В.С. Архипкин², С.А. Мысленков³, Г.В. Шевченко⁴МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ О. САХАЛИН⁵

Выполнено моделирование штормовых ситуаций в Охотском море в 1990 и 1995 гг. с использованием модели ADCIRC. Модель адаптирована для Охотского моря, для чего на основе данных об абсолютных высотах подводного рельефа была создана нерегулярная расчетная сетка с разрешением до 500 м. В качестве вынуждающих сил использованы данные реанализа NCEP/CFSR ветра и атмосферного давления. Проведено сравнение рассчитанных значений высоты уровня моря с данными инструментальных наблюдений в пунктах на о. Сахалин. На основе результатов численного моделирования оценен вклад атмосферного давления в формирование штормовых нагонов, рассчитаны статистические параметры для рядов (корреляция, среднеквадратическое отклонение, систематическая ошибка). Выявлено пространственное распределение максимумов уровня за все время расчета — наибольшие значения подъема уровня в обоих случаях зафиксированы в заливах Сахалинском и Терпения.

Ключевые слова: штормовые нагоны, численное моделирование, уровень моря, Охотское море.

Введение. Штормовые нагоны — одно из самых опасных природных явлений, которое уносит больше всего жизней на Земле [Любицкий и др., 2013]. К 2014 г. собрано и проанализировано колоссальное количество данных о механизмах их формирования, предпосылках возникновения, о районах, подверженных штормовым нагонам, созданы системы прогнозирования нагонов [Ашик, 2005; Glahn et al., 2009; Higaki et al., 2007; SLOSH, 2014]. Во многих странах осуществляются мероприятия по защите населения и инфраструктуры от воздействия нагонов. Однако нельзя сказать, что на всех побережьях, где наблюдаются штормовые нагоны, используют эффективные меры по предотвращению ущерба. Чаще всего остаются без систем защиты от последствий нагонов побережья стран третьего мира, где не выделяется достаточно средств для проведения предохранительных мероприятий, а также относительно малонаселенные районы, к которым в России относится о. Сахалин.

До 90-х гг. прошлого века на Сахалине принято было считать, что нагоны опасны лишь в северной малонаселенной части острова, где их величина составляет 2 м и более. Однако сильнейшие нагоны 10–11 ноября 1990 г. и 8–9 ноября 1995 г. заставили пересмотреть сложившееся мнение. Благодаря сведениям об ущербе от этих нагонов, приведенным в работах [Като и др., 2001; Шевченко и др., 1994],

можно с полной уверенностью утверждать, что и для южных частей о. Сахалин, где проживает основная часть населения, штормовые нагоны также могут быть бедствием. В первую очередь от нагонов страдают морские порты, а также железнодорожные и автомобильные магистрали, которые на значительном протяжении прижаты горами к побережью, — дорожное полотно размывается штормовыми волнами, а берегозащитные укрепления при сильных нагонах разрушаются.

За последние 20 лет в России уменьшилось число и без того немногочисленных постов, где проводятся наблюдения за уровнем моря *in situ*, поэтому практически единственным доступным методом для ретроспективного анализа и прогноза нагонов становится моделирование.

Уровенный режим Охотского моря исключительно сложен для изучения вследствие различия синоптических процессов в разных районах моря, а также приливных движений, ледовых условий, рельефа дна и конфигурации берегов [Гидрометеорология..., 1998]. Основными факторами, вызывающими нагоны в Охотском море, считаются ветер (непосредственное перемещение воды через касательное напряжение ветра) и атмосферное давление (понижение уровня моря при повышении давления, называемое эффектом “обратного барометра”) [там же].

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; *e-mail:* lapoul@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail:* victor.arkhipkin@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с.; *e-mail:* stasoccean@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с.; *e-mail:* stasoccean@gmail.com

⁵ Разработка методики исследования выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 14-37-00038).

Не так много работ, посвященных изучению и прогнозированию штормовых нагонов в районе о. Сахалин, — в большинстве случаев использовались эмпирические [Куликова и др., 1965] или статистические методы [Герман и др., 1986; Като и др., 2011; Савельев, 1984]. Гидродинамические методы расчетов нагонов применялись для юго-восточного и восточного побережий Сахалина и Сахалинского залива, где опасные подъемы уровня затрудняют их хозяйственное освоение. Большой вклад в создание моделей для этих районов внес Ю.В. Любицкий [Любицкий, 1983; Любицкий, 1986; Любицкий и др., 2010]. В ходе численных экспериментов удалось определить некоторые особенности формирования штормовых нагонов в указанном районе. Однако большой пространственный шаг расчетной сетки (7 км и более в разных экспериментах) не позволяет составить детальное представление о колебаниях уровня и воздействии нагонов на небольшие по протяженности участки побережья, особенно в районах населенных пунктов.

Основная цель работы — проверить применимость модели ADCIRC для моделирования штормовых нагонов на о. Сахалин. Для этого авторами выполнено моделирование нескольких штормовых ситуаций, которые привели к значительным подъемам уровня моря. Качество модели оценивалось на основании сравнения полученных результатов с данными наблюдений.

Материалы и методы исследований. Нами использована модель ADCIRC (Advanced Circulation model) [ADCIRC], разработанная в Университете Северной Каролины (Чапел Хилл). Это высоко-развитая компьютерная программа для решения уравнений движения жидкости на вращающейся Земле. Уравнения формулируются с учетом гидро-

статического приближения и приближения Буссинеска, а затем дискретизируются в пространстве с помощью метода конечных элементов и во времени с использованием метода конечных разностей. Модель ADCIRC можно применять как в качестве двухмерной модели, интегрируемой по глубине, так и в качестве трехмерной модели. В любом случае превышение уровня получается из решения интегрированного по глубине уравнения неразрывности в виде обобщенного уравнения волн и неразрывности (GWCE, Generalized Wave-Continuity Equation). Скорость рассчитывается из уравнений движения, все нелинейные члены сохраняются [Dietrich et al., 2012].

Исходным материалом для создания расчетной сетки послужили данные об абсолютных высотах рельефа (Gridded Global Relief Data, ETOPO2 Ver. 2) с разрешением 2 минуты [National Geophysical Data Center] — всего 550 516 точек. Кроме того, для части Амурского лимана, Татарского пролива и пролива Невельского проводилась ручная оцифровка топографических карт ГосГИС центра (ГГЦ) в масштабе 1:200 000 [Карты..., 2014]. Это было сделано для повышения точности батиметрии в узком проливе — связующем звене между Японским и Охотским морями. При расчетах использована нерегулярная сетка. Поскольку наибольший интерес представляет прибрежная часть о. Сахалин, то для нее и установлен наименьший размер ячеек — ~500 м (рис. 1, А). Для материковой береговой линии и крупных островов (Хоккайдо, Курильские о-ва) размер ячеек составил 5–8 км, для двух протяженных открытых границ — 7–10 км, для береговой линии небольших островов и коротких открытых границ — 2–4 км, для береговой линии о. Сахалин — 500 м. В открытой части моря и у материкового берега разрешение составило ~9–10 км (рис. 1, Б).

Характеристики пунктов наблюдений

Пункт	Координаты, с.ш., в.д., град.	Параметры	Штормовые ситуации, годы
Углегорск	49,076 142,074	уровень моря, скорость ветра, атмосферное давление	1990, 1995
Поронайск	49,217 143,100	то же	1990, 1995
Стародубское	47,417 142,850	— " —	1990, 1995
Корсаков	46,650 142,767	— " —	1990, 1995
Холмск	47,050 142,050	— " —	1990, 1995
Невельск	46,685 141,859	уровень моря	1990
Набиль	51,509 143,275	то же	1995
Де-Кастри	51,467 140,773	— " —	1995

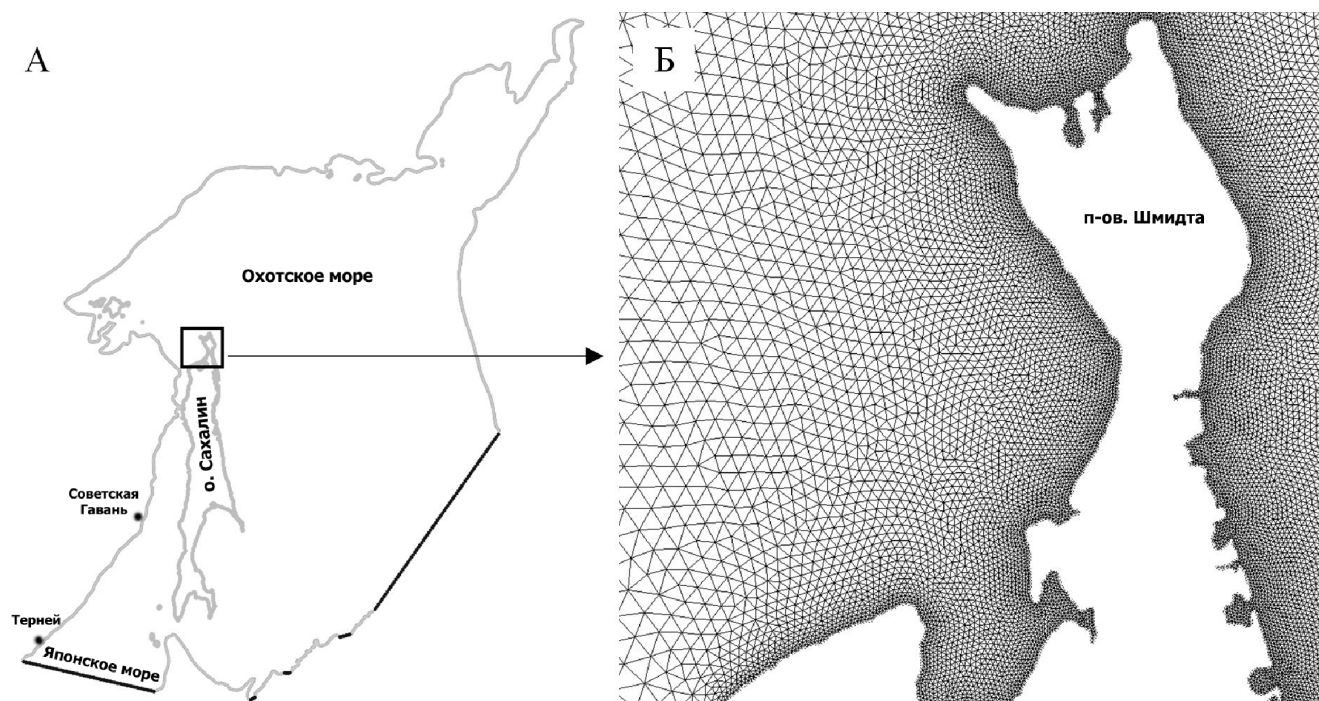


Рис. 1. Район исследования: А — расчетный полигон, открытые границы показаны темно-серым; Б — пример нерегулярной расчетной сетки

Из вынуждающих сил задавались поля атмосферного давления на уровне поверхности земли и ветра на высоте 10 м, которые были получены из реанализа NCEP/CFSR. Пространственное разрешение реанализа $\sim 0,3^\circ$, дискретность 1 ч [CISL..., 2014]. На всей области моделирования содержится 104×64 точек из реанализа.

При постановке задачи расчета штормовых нагонов с помощью модели ADCIRC было решено не учитывать приливы в расчетной области, хотя возможности модели позволяют это. Приливы Охотского моря имеют чрезвычайно сложные особенности, поэтому для успешной работы модели данные о периодических колебаниях необходимо задавать на всей области, а не в нескольких точках, для которых есть данные измерений. В связи с этим для каждой точки всех открытых границ задавали фиксированный уровень +1 см. Это позволило свести к минимуму возможные ошибки в расчетах и рассчитать штормовой нагон в чистом виде, без приливной составляющей.

Для оценки качества модели полученные с ее помощью характеристики сравнивали с данными наблюдений на уровневых постах в Углегорске, Поронайске, Стародубском, Корсакове, Холмске, Невельске, зал. Набиль (о. Сахалин) и пос. Де-Кастри (Хабаровский край). Из этих данных были вычтены периодические колебания (приливы), чтобы обеспечить корректное сравнение с данными моделирования. Дискретность измерений уровня моря 1 ч (таблица). Из статистических характеристик рассчитывали только среднеквадратическое отклонение (σ) и систематическую ошибку (δ), так как ряды данных для сравнения представляют собой

два случая длиной 2 сут, чего явно недостаточно для полного статистического анализа ошибок моделирования.

Результаты исследований и их обсуждение. Штормовой нагон 10–11 ноября 1990 г. выбран в качестве первой моделируемой ситуации, так как в результате циклона значительно повысился уровень практически на всем побережье Сахалина, причем в некоторых районах он достиг абсолютного максимума — 101 см в Невельске, 97 см в Холмске, 90 см в Корсакове [Като и др., 2001]. Инфраструктуре острова был причинен крупный ущерб, особенно тяжелыми были последствия нагона для объектов на южном и юго-западном побережье [Шевченко и др., 1994].

В 00:00 ч (время здесь и далее по Гринвичу) 9 ноября в Восточно-Китайском море на волне полярного фронта образовался циклон с давлением в центре 1010 ГПа. Углубляясь, циклон начал смещаться на север-северо-восток со скоростью 75 км/ч. В 00:00 ч 10 ноября циклон с глубиной 975 ГПа вышел к северо-западному побережью о. Хоккайдо, где произошла его регенерация на арктическом фронте. Циклон углубился еще на 15 ГПа, замедлил скорость смещения до 30 км/ч и в 12:00 ч 10 ноября находился на юге Татарского пролива с давлением в центре 960 ГПа. В течение 6 ч он был малоподвижен, а затем начал быстро заполняться и отходить на северо-восток.

В первой половине дня 10 ноября на акваториях, прилегающих к южной части Сахалина, отмечался восточный, северо-восточный ветер со скоростью 15–20 м/с, порывами до 25 м/с. После 6 ч произошел переход к южному, юго-западному ветру

со скоростью 25–30 м/с, с порывами до 37 м/с. Ветер сохранялся в течение ночи 11 ноября, а затем начал ослабевать [Като и др., 2001].

Как показывает сравнение результатов моделирования с результатами измерений на береговых постах, в преобладающем большинстве случаев именно распределение атмосферного давления и его изменение во времени играют основную роль в формировании штормового нагона (рис. 2). При использовании только ветра в качестве вынуждающей силы уровень повышается незначительно, и только в пик формирования нагона находится выше отметки 0 м, в остальное время ветер, видимо, вызывает сгон. При добавлении в расчет данных об атмосферном давлении ситуация кардинально меняется. Максимальные наблюдавшиеся значения уровня для пунктов на Охотоморской стороне Сахалина воспроизводятся моделью с точностью до 10–15 см, время наступления максимума — с точностью до 1 ч (за исключением Поронайска, для которого разница составила 4 ч, рис. 2). Высокие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о том, что воспроизводимость колебаний уровня при нагоне высокая. Кроме того, были рассчитаны среднеквадратическое отклонение (σ) и систематическая ошибка (δ). Для Корсакова δ имеет наибольшее абсолютное значение (–0,11 м), для остальных пунктов — несколько сантиметров.

Вклад давления рассчитывали для тех промежутков времени, когда кривая результатов моделирования только с учетом ветра находилась выше 0 м (рис. 2). Для этого из значений ряда “Модель (давление и ветер)” вычитали значения ряда “Модель (только ветер)”, затем рассчитывали долю разницы в значениях ряда “Модель (давление и ветер)”. Поскольку области с положительными значениями ряда “Модель (только ветер)” охватывают меньше 1/2 от всего времени расчета, уместнее говорить о среднем максимальном вкладе атмосферного давления в формирование нагона. Во всех случаях вклад давления составляет больше половины от общего вклада и преобладает.

На рис. 3 приведено пространственное распределение максимумов повышения уровня за все время расчета (2,5 сут), видно, что в прибрежной области Сахалина наибольший нагон (~1 м) наблюдался в заливах Терпения и Сахалинском. Кроме того, можно хорошо проследить, как со стороны Японского моря нагон “гасится” близостью открытой границы, где в качестве граничных условий задан фиксированный уровень +1 см (рис. 1).

Штормовой нагон 8–9 ноября 1995 г. Как и в предыдущем случае, циклон вызвал подъем уровня моря на побережье Сахалина до рекордных значений — Поронайск — 110 см, зал. Набиль — 93 см. Параметры штормовых нагонов в ноябре 1990 г. и в 1995 г. были достаточно близки, более значительная величина ущерба в 1995 г. обусловлена, вероятно, попаданием нагона на положительную фазу прилива (в 1990 г. максимум неперiodической ком-

поненты пришелся на отрицательную фазу [Шевченко и др., 1994]).

Важная общая черта, присущая практически всем синоптическим ситуациям, при которых наблюдались опасные штормовые нагоны, повлекшие материальный ущерб, — замедление скорости смещения барических образований над прибрежными областями Сахалина. Центр циклона описывал своеобразную петлю либо оставался на месте, в результате чего устанавливался сильный и продолжительный ветер, способствующий формированию нагонных волн на отдельных участках побережья. Оказалось, что один из наиболее опасных случаев отвечает положению центра циклона в южной части Татарского пролива. При этом на юго-западном и южном побережье Сахалина преобладают нагонные юго-западные ветры, а на побережье залива Терпения и северо-востоке — восточные. Именно к таким случаям относятся штормовые ситуации, возникшие 10 ноября 1990 г. и 8 ноября 1995 г.

В 1995 г. на погоду Сахалина повлиял глубокий циклон, который 7 ноября зародился над Желтым морем на волне полярного фронта. Для развития циклона сложились крайне благоприятные термические условия — над Желтым морем и югом Японского находился воздух тропического происхождения, а над Хабаровским краем и северо-востоком Китая — арктический. Циклон, углубляясь, смещался на северо-восток. Днем 8 ноября циклон с давлением в центре 960 ГПа вышел на юг Татарского пролива, здесь в него вошел арктический фронт, произошло дальнейшее углубление циклона. Приземное давление за 3 ч снизилось на 14 ГПа. Циклон начал развиваться по высоте и замедлил скорость смещения. Над югом Сахалина он достиг стадии максимального развития, давление в центре упало до 945 ГПа, что наблюдается в крайне редких случаях. В ночь на 8 ноября, когда циклон находился над перешейкой Поясок, на юг Сахалина повлияла его южная периферия. Градиент давления составил 25 ГПа на 2° широты (34 ГПа на 300 км). Началось вторжение арктического холодного воздуха. На крайнем юге юго-западный ветер усилился до 45 м/с. На мысе Крильон порывы ветра достигали 60 м/с [Като и др., 2001].

Для оценки качества расчета результаты моделирования сравнили с данными наблюдений (рис. 4). К 1995 г. были закрыты береговые посты в Корсакове, Стародубском и Невельске, поэтому, чтобы провести сравнение в наибольшем числе пунктов, были привлечены данные наблюдений за уровнем в заливе Набиль (Сахалин) и пос. Де-Кастри (Хабаровский край).

Наиболее точно штормовой нагон воспроизведен моделью для Поронайска и Углегорска — разница между наблюдаемыми и рассчитанными максимальными уровнями не превышала 5–10 см, максимумы были достигнуты почти одновременно. В заливе Набиль расчетный максимум запаздывал на несколько часов, но в целом нагон во всех 3 пунктах был достоверно воссоздан моделью.

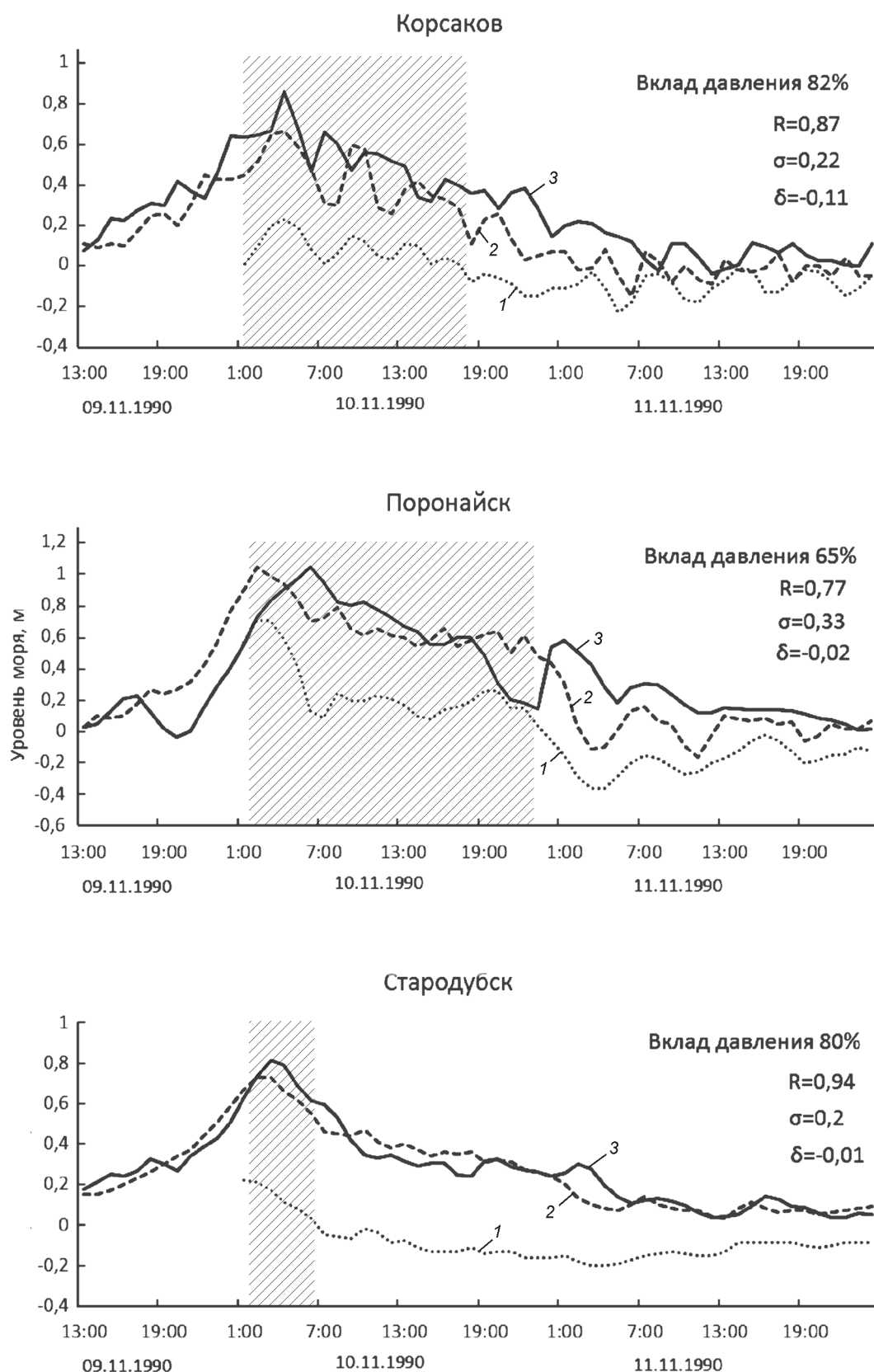


Рис. 2. Данные наблюдений и результаты моделирования штормового нагона 1990 г. в пунктах на Сахалине: 1 — модель “только ветер”, 2 — модель “давление и ветер”, 3 — наблюдения. Коэффициент корреляции (R) и систематическая ошибка (δ) рассчитаны для кривых 2 и 3, среднеквадратическое отклонение (σ) — для кривой 2. Оконтурены области, для которых рассчитан вклад атмосферного давления (пояснения см. в тексте)

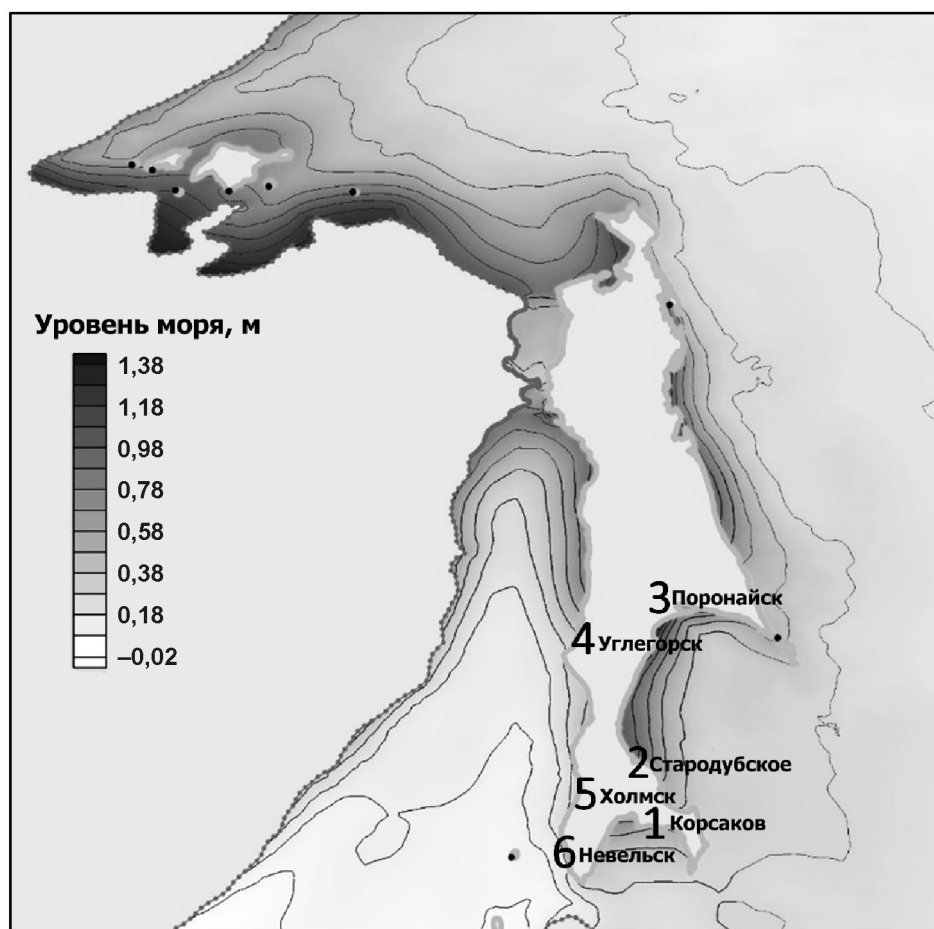


Рис. 3. Максимальный уровень воды за время расчета и пункты наблюдений за уровнем, для которых производилось сравнение с данными моделирования: 1 — Корсаков, 2 — Стародубское, 3 — Поронайск, 4 — Углегорск, 5 — Холмск, 6 — Невельск

Что касается вклада атмосферного давления в формирование нагона, то можно говорить о его преобладающем значении. Для Углегорска подобные вычисления не проводили, поскольку у ряда “Модель (только ветер)” практически в течение всего цикла расчетов сохранялись отрицательные значения.

На рис. 5 показано распределение максимального уровня воды, достаточно похожее по сравнению с нагоном в ноябре 1990 г., что подтверждает схожую природу этих редких по силе циклонов, следствием которых стали сильнейшие подъемы уровня.

Выводы:

— модель ADCIRC адаптирована к условиям Охотского моря, создана неструктурированная расчетная сетка с высоким (500 м) разрешением в прибрежных областях;

— в ходе исследований доказано, что использование модели ADCIRC в условиях Охотского моря оправданно, расчеты достоверно воспроизводят данные инструментальных измерений положения уровня моря;

— выявлено преобладающее влияние атмосферного давления на нагонные колебания уровня (вклад >65% для всех пунктов);

— созданную технологию ретроспективного анализа штормовых нагонов можно использовать и для прогноза нагонов, если в качестве вынуждающих сил задавать прогностические поля ветра и давления. Однако качество прогнозов, как правило, хуже реанализа, поэтому необходимо отдельно оценивать качество прогнозов. Планируется добавить в модель приливные колебания, что позволит учитывать все факторы, обуславливающие изменение уровня моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

Ашик И.М. Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского моря // Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. № 31. М.: Изд-во Метеоагентства Росгидромета, 2005. С. 85–103.

Ashik I.M. Chislennyj gidrodinamicheskij metod prognoza kolebanij urovnja v jugo-vostochnoj chasti Barentseva i jugo-zapadnoj chasti Karskogo morja [The numerical hydrodynamic method of forecasting fluctuations in the south-eastern part of the Barents Sea and the southwestern part of the Kara Sea], Informacionnyj sbornik no 31, Rezul'taty

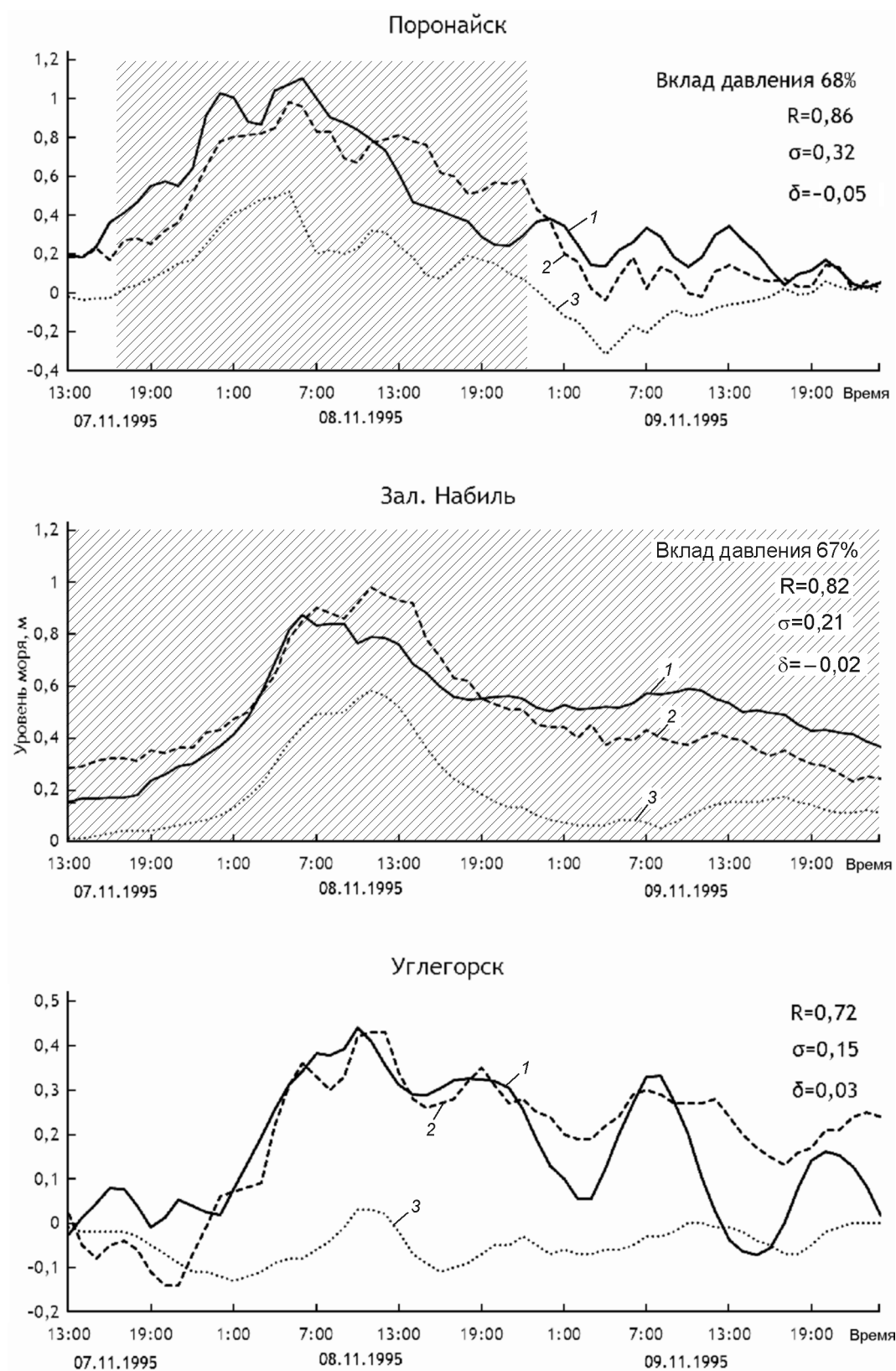


Рис. 4. Данные наблюдений и результаты моделирования штормового нагона 1995 г. в пунктах на Сахалине: 1 — наблюдения, 2 — модель “ветер и давление”, 3 — модель “только ветер”. Коэффициент корреляции (R) и систематическая ошибка (δ) рассчитаны для кривых 1 и 2, среднеквадратическое отклонение (σ) — для кривой 2. Оконтурены области, для которых рассчитан вклад атмосферного давления

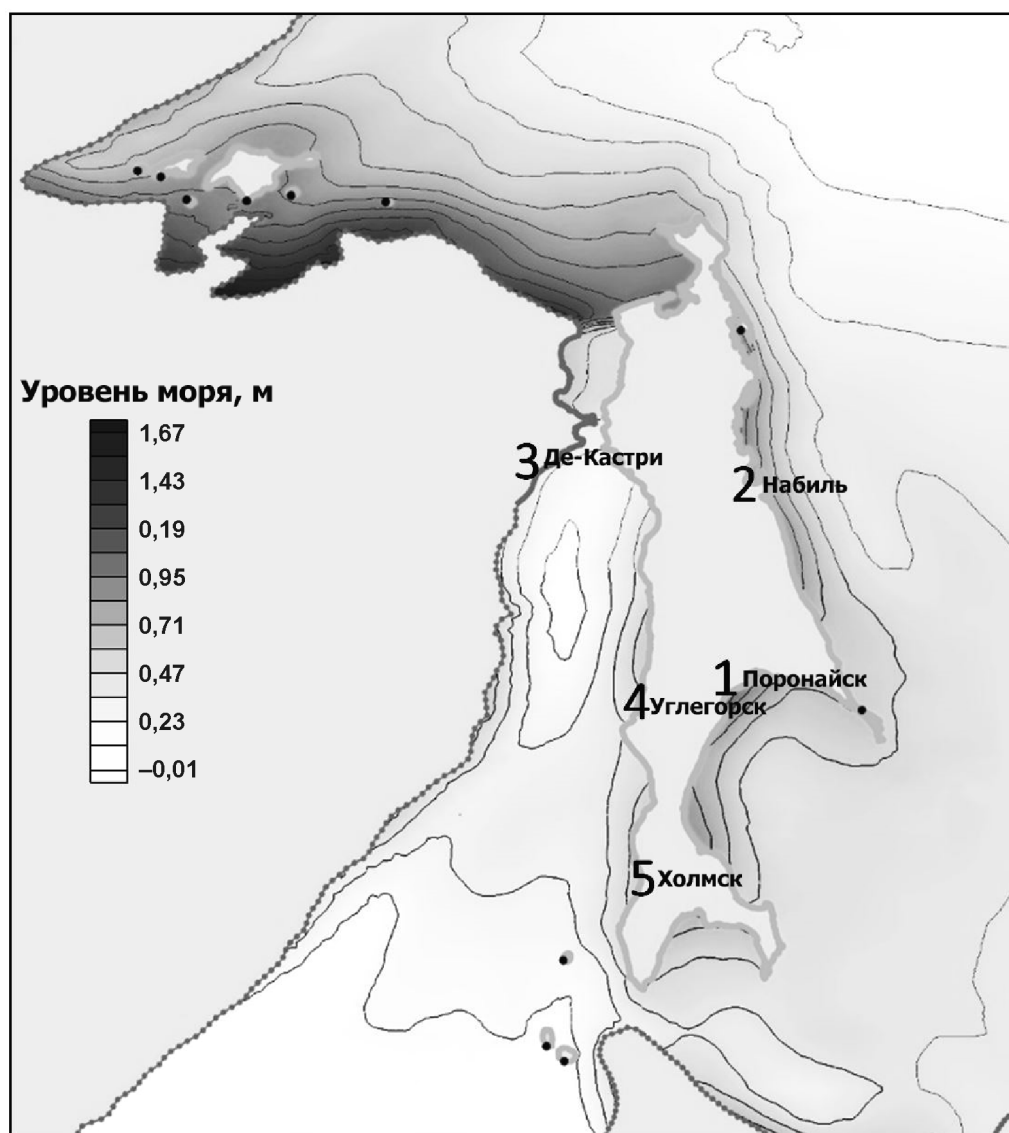


Рис. 5. Максимальный уровень воды за время расчета и пункты наблюдений за уровнем, для которых производилось сравнение с данными моделирования: 1 — Поронайск, 2 — залив Набиль, 3 — Де-Кастри, 4 — Углегорск, 5 — Холмск

ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov, Izdatel'stvo Meteoagentstva Rosgidrometa, Moscow, 2005, pp. 85–103 (in Russian).

Герман В.Х., Савельев А.В. Расчет штормовых нагонов в Охотском море методом спектральной регрессии // Океанология. 1986. Т. 26, вып. 3. С. 409–415.

German V.H., Savelyev A.V. Raschet shtormovykh nagonov v Ohotskom more metodom spektral'noj regressii [Calculation of storm surge in the Sea of Okhotsk by spectral regression], Okeanologiya, 1986, Vol. 26, no 3, pp. 409–415 (in Russian).

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej. Ohotskoe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas, The Sea of Okhotsk], Vol. 9, Gidrometeoizdat, Saint-Petersburg, 1998, 342 p. (in Russian).

Карты всего мира. URL: <http://loadmap.net/> (дата обращения: 14.04.2014).

Karty vsego mira [Maps of the world]. URL: <http://loadmap.net/> (Accessed: 14.04.2014) (in Russian).

Като Э., Любичкий Ю.В., Шевченко Г.В. Экстремальные высоты штормовых нагонов на побережье о. Сахалин // Мореходство и морские науки. 2011. Избр. докл. Третьей Сахалинской региональной морской научн.-техн.

конф. (15–16 февраля 2011 г.) // Под ред. В.Н. Храмушина. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. С. 177–193.

Kato J., Ljubickij J.V., Shevchenko G.V. Jekstremal'nye vysoty shtormovykh nagonov na poberezh'e o. Sahalin [Extreme height of storm surges on the coast of Sakhalin Island], Morehodstvo i morskije nauki, Izbrannye doklady Tret'ej Sahalinskoj regional'noj morskoy nauchno-tehnicheskoy konferencii (15–16 fevralja 2011 g.), SahGU, Juzhno-Sahalinsk, 2011, pp. 177–193 (in Russian).

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.

Kato J., Mis'kov O.A., Shevchenko G.V. Shtormovye nagony na poberezh'e ostrova Sahalin v konce XX veka [Storm surges on the coast of Sakhalin Island in the late twentieth century], Dinamicheskie processy na shel'fe Sahalina i Kuril'skikh ostrovov, IMGIG DVO RAN, Juzhno-Sahalinsk, 2001, pp. 160–176 (in Russian).

Куликова В.С., Булгаков Н.П. Ветровые нагоны у побережья о. Кунашир и Итуруп: методическое письмо. Южно-Сахалинск, 1965. 49 с.

Kulikova V.S., Bulgakov N.P. Vetrovye nagony u poberezh'ja o. Kunashir i Iturup: metodicheskoe pis'mo [Wind surges near the coast of the islands of Kunashir and Iturup: methodical letter], Juzhno-Sahalinsk, 1965, 49 p. (in Russian).

Любицкий Ю.В. Расчет штормовых нагонов на юго-восточном побережье о. Сахалин // Метеорология и гидрология. 1983. № 10. С. 73–79.

Ljubickij J.V. Raschet shtormovyh nagonov na jugo-vostochnom poberezh'e o. Sahalin [Calculation of storm surge in the south-east coast of Sakhalin Island], Meteorologija i gidrologija, 1983, no 10, pp. 73–79 (in Russian).

Любицкий Ю.В. Расчет суммарных уровней моря на приливном устьевом взморье реки при штормовых ситуациях (на примере Амура) // Тр. ГОИН. 1986. Вып. 179. С. 38–49.

Ljubickij J.V. Raschet summarnyh urovnej morja na prilivnom ust'evom vzmor'e reki pri shtormovyh situacijah (na primere Amura) [Calculation of total sea level on estuarine tidal river coast during the storm situations (for example, the Amur)], Trudy GOIN, 1986, V. 179, pp. 38–49 (in Russian).

Любицкий Ю.В., Вербицкая Е.М., Вербицкая З.В., Мякина Л.С. Метод и технология прогноза штормовых нагонов в Амурском лимане и Сахалинском заливе // ДВНИГМИ — 60 лет. Владивосток: Дальнаука, 2010. С. 57–73.

Ljubickij J.V., Verbickaja E.M., Verbickaja Z.V., Mjaki-na L.S. Metod i tehnologija prognoza shtormovyh nagonov v Amurskom limane i Sahalinskom zalive [Method and technology of prediction of storm surges in the Amur estuary and Sakhalin Bay], DVNIGMI — 60 let, Dal'nauka, Vladivostok, 2010, pp. 57–73 (in Russian).

Любицкий Ю.В., Шевченко Г.В., Елисов В.В. Штормовые нагоны // Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. М.: Научный мир, 2013. С. 559–575.

Ljubickij J.V., Shevchenko G.V., Elisov V.V. Shtormovye nagony [Storm surges], Mirovoj okean, V. 1, Geologija i tektonika okeana, Katastroficheskie javlenija v okeane, Nauchnyj mir, Moscow, 2013, pp. 559–575 (in Russian).

Савельев А.В. Применение метода спектральной регрессии для расчета штормовых нагонов в Охотском море // Тез. докл. 4-й конф. молодых ученых ДВНИИ, 23–25 ноября 1985 г. Владивосток, 1984. С. 17–18.

Savel'ev A.V. Primenenie metoda spektral'noj regressii dlja rascheta shtormovyh nagonov v Ohotskom more [Application of spectral regression to calculate the storm surges in the Sea of Okhotsk], Tezisy dokladov 4 konferencii molodyh uchenyh DVNII, 23–25 nojabrja 1985 g., Vladivostok, 1984, pp. 17–18 (in Russian).

Шевченко Г.В. Статистические характеристики штормовых нагонов в южной части о. Сахалин // Изв. РГО, 1997. Т. 129, № 3. С. 94–107.

Shevchenko G.V. Statisticheskie harakteristiki shtormovyh nagonov v juzhnoj chasti o. Sahalin [Statistical characteristics of storm surges in the southern part of Sakhalin Island], Izvestija RGO, 1997, Vol. 129, no 3, pp. 94–107 (in Russian).

Шевченко Г.В., Любицкий Ю.В., Като Л.Н. Проявления штормовых нагонов в южной части острова Сахалин. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1994. 44 с.

Shevchenko G.V., Ljubickij J.V., Kato L.N. Projavlenija shtormovyh nagonov v juzhnoj chasti ostrova Sahalin [Manifestations of storm surges in the southern part of Sakhalin Island], IMGIG DVO RAN, Juzhno-Sahalinsk, 1994, 44 p. (in Russian).

ADCIRC. URL: <http://adcirc.org> (Accessed: 13.04.2014).

CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu/> (Accessed: 13.04.2014).

Dietrich J.C., Tanaka S., Westerink J.J. et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ADCIRC model in computing hurricane waves and surge // J. Sci. Comput. 2012. Vol. 52 (2). P. 468–497.

Glahn B., Taylor A., Kurkowski N., Shaffer W. The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting // Nat. Weather Digest. 2009. Vol. 33, N 1. P. 3–14.

Higaki M., Hayashibara H. Operational storm surge forecasting at Japan Meteorological Agency // JCOMM Scien. and Techn. Symp. Storm Surges. Seoul, Korea, 2–6 Oct. 2007.

National Geophysical Data Center. NOAA. URL: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html (Accessed: 12.04.2014).

SLOSH (Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes). URL: <http://www.nhc.noaa.gov/surge/slosh.php> (Accessed: 11.04.2014).

Поступила в редакцию
25.12.2014

A.A. Ivanova, V.S. Arkhipkin, S.A. Myslenkov, G.V. Shevchenko

MODELING OF STORM SURGES IN THE COASTAL ZONE OF THE SAKHALIN ISLAND

The 1990 and 1995 storm situations in the Sea of Okhotsk were modeled using the ADCIRC model adapted for the Sea of Okhotsk by producing the irregular computation grid of 500 m resolution basing on the absolute heights of bottom topography. Wind and air pressure data of the NCEP/GFSR reanalysis were used as constraining forces. Computed values of the sea level were correlated with the data of instrumental observations at several sites of the Sakhalin Island. The results of numerical modeling made it possible to evaluate the role of air pressure in the formation of storm surges and compute a number of statistical parameters (correlation, standard deviation, systematic error, etc.). The spatial pattern of the maximum water levels for the whole computation period showed the highest water rise in the Sakhalin Bay and the Terpeniya Bay for both cases.

Key words: storm surges, numerical modeling, sea level, the Sea of Okhotsk.