

УДК: 551.465.1+551.321.8

© В. Ю. Чанцев^{1,2}, А. В. Даньшина¹¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург² Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
chantsev@hotmail.com

РАСЧЕТ ВНУТРИГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБСКОЙ ГУБЫ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Статья поступила в редакцию 28.02.2019, после доработки 03.07.2019

Это исследование основано на анализе данных численных экспериментов, выполненных с помощью адаптированной для района Обской Губы конфигурации модели Delft3D. В работе рассматриваются результаты численного моделирования внутригодовой изменчивости отдельных параметров термо-, гидродинамического и ледового режима изучаемого района на расчетной сетке с пространственным разрешением 50–100 м по горизонтали и 1–2 м по глубине и использованием режима негидростатики. Подбор значений управляющих параметров позволил вывести данную конфигурацию модели на устойчивый режим работы и наиболее полно адаптировать ее к условиям высоких (полярных) широт.

Проведенные численные эксперименты показали адекватное воспроизведение гидрофизического и ледового режима Обской губы в течение расчетного периода. Полученные в ходе расчетов данные были сопоставлены с имеющимися натурными наблюдениями, выполненными в Обской губе. По результатам моделирования скорости течения, колебания уровня моря и толщины ледяного покрова была проведена оценка погрешностей расчетов для демонстрации качества работы адаптируемой конфигурации модели. Выполненный сравнительный анализ эволюции выбранных параметров, полученных в результате численных экспериментов, с данными наблюдений продемонстрировал положительные возможности модельного комплекса Delft3D. Максимальные величины погрешностей расчета в основном зависят от качества исходных данных. Таким образом, адаптируемый к району Обской губы модельный комплекс Delft3D может быть использован для успешного разрешения ряда прикладных гидрометеорологических, морфологических и экологических задач в области освоения и эксплуатации данного Арктического региона.

Ключевые слова: Обская губа, ледовые условия, уровень моря, гидродинамический режим, приливные колебания, численное моделирование.

V.Yu. Chantsev^{1,2}, A.V. Danshina¹¹ Arctic and Antarctic Research Institute, St.-Petersburg, Russia² Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

A CALCULATION OF THE INTRA-ANNUAL DYNAMICS OF OB BAY HYDROPHYSICAL REGIME WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

Received 28.02.2019, in final form 03.07.2019

This study is based on numerical experiments data analysis performed using the Delft3D model configuration adapted for Ob Bay region. The work discusses the results of numerical simulation of the intra-annual variability of individual parameters of the thermo-, hydrodynamic and ice regime of investigated area on a computational grid with a spatial resolution of 50–100 m horizontally and 1–2 m depthly, and using the non-hydrostatic mode. The selection of control parameters values made possible to bring this configuration of the model to a stable mode of function and most fully adapt it to the conditions of high (polar) latitudes.

The performed numerical experiments showed an adequate reproduction of the hydrophysical and ice regime of Ob Bay during the calculation period. The data obtained in calculations process were compared with the available in-situ

Ссылка для цитирования: Чанцев В.Ю., Даньшина А.В. Расчет внутригодовой динамики гидрофизического режима Обской губы с высоким пространственным разрешением // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 55–64

For citation: Chantsev V.Yu., Danshina A.V. A calculation of the intra-annual dynamics of the Ob Bay hydrophysical regime with high spatial resolution. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 3, 55–64

DOI: 10.7868/S2073667319030079

observations made in Ob Bay. To demonstrate the operation quality of the model's adaptable configuration, based on the results of modeling the current velocity, fluctuations in sea level and ice cover thickness, an estimate of the calculation errors was performed. A comparative analysis of the evolution of selected parameters obtained as a result of numerical experiments with observational data demonstrated the positive capabilities of the Delft3D model complex. The maximum values of the calculation errors mainly depend on the quality of the input data. Thus, the Delft3D model complex adapted to Ob Bay area can be used to successfully resolve some applied hydrometeorological, morphological, and environmental problems in the development and operation of this Arctic region.

Keywords: Ob Bay, ice conditions, sea level, hydrodynamic regime, tidal fluctuations, numerical simulation.

Возвращение государственного интереса к освоению Арктического региона в целях его эффективной эксплуатации требует планомерных и длительных гидрометеорологических изысканий. Наиболее стратегически важным районом Арктики является Обская губа Карского моря. Эта зона представляет собой регион, где реализуются перспективные ресурсные и транспортные проекты. В связи с этим нужно отметить, что морфометрические и погодные особенности этого района требуют изучения изменчивости гидрофизических и литодинамических процессов с высоким пространственным разрешением. Не исключено, что строящиеся различные гидротехнические сооружения вроде портов, проходных каналов и т.д. могут оказывать влияние на изменение лито- и гидрологического режима. В свою очередь опасные теплофизические и динамические явления, величину которых необходимо оценивать, будут воздействовать на все элементы морской инфраструктуры. Климат Арктики ограничивает пространственно-временную детализацию натуральных наблюдений, что вызывает необходимость использования методов численного моделирования для получения более полной информации о состоянии водной среды с требуемым разрешением.

Для осуществления численных расчетов гидрофизических процессов в Обской губе необходима модель, способная выполнять вычисления на сетке с разрешением до 10–100 м. Необходимость высокой пространственной детализации определяется условиями гидротехнической деятельности в отдельных районах рассматриваемого региона. В тоже время самые известные и распространенные на сегодняшний день океанские модели имеют ограничения в пространственной детализации 1–3 км [1], а использование процедур телескопизации может приводить к увеличению погрешностей численных расчетов [2]. Первые попытки численного моделирования гидрологических процессов в Обской губе с пространственным разрешением менее 500 м были выполнены Архиповым Б.В. [3], но акцент в этой работе делался только на северную часть губы.

Особенности использования модели Delft3D, адаптируемой к условиям Обской губы

Необходимые расчеты можно производить на адаптируемом к условиям Обской губы модельном комплексе Delft3D. Особенностью этого комплекса является то, что он создавался как раз для условий прибрежных районов морей и эстуариев. Delft3D представляет собой модульную систему, обеспечивающую комбинирование структуры решаемой задачи. Комплекс содержит удобный графический интерфейс подготовки вычислительного процесса и визуализации результатов моделирования. Численная модель Delft3D предназначена для проведения расчетов наиболее важных процессов и явлений, происходящих в водной среде: приливных и ветровых явлений; градиентных и стоковых течений; цунами, наводнения и гидравлических скачков; распространения нефтяных разливов, растворенного материала и других загрязняющих веществ; переноса осадков и морфологических изменений; осушки и затопления берегов.

Основным расчетным модулем в модели Delft3D является модуль Delft3D-FLOW. На его основе осуществляется работа остальных модулей комплекса. Расчет течений в модуле Delft3D-FLOW может выполняться как на основе уравнений мелкой воды (2D), так и с учетом бароклинной моды (3D). Особенностью адаптируемой к условиям Обской губы модели является возможность подключения негидростатического подхода при расчете течений, что позволяет более точно описывать мелкомасштабные вихревые структуры и процессы плотностной неустойчивости. Для этого осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье – Стокса будет записано как:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \varepsilon_{ijk} 2\Omega_j u_k + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\Delta p}{\rho_0} g \delta_{i3} = 0, \quad (1)$$

где δ_{ij} – дельта функция Кронекера, ε_{ijk} – символ перестановки, Ω_j – планетарная завихренность, τ_{ij} – турбулентные напряжения, ρ_0 – плотность окружающей воды, а $\Delta\rho = \rho(T, S, p) - \rho_0$.

Давление p разбивается на гидростатическую и гидродинамическую (p_d) часть:

$$p = p_{атм} + g \int_{-H}^{\zeta} \rho dz + p_d. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности представлено из условия несжимаемости. Тогда, интегрируя его по глубине и применяя кинематическое граничное условие, имеем:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\zeta} v dz = 0, \quad (3)$$

где ζ – превышение уровня моря, H – глубина места.

Гидродинамическая часть давления в Delft3D определяется из уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_d}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_d}{\partial z^2} = \rho_0 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Решение уравнения Пуассона (4) осуществляется с использованием метода коррекции давления, аналогично методу, описанному Касулли (Casulli) [4]. Баротропный градиент давления вычисляется неявно, чтобы избежать ограничений временного шага из-за условий устойчивости. Для обеспечения вычислительной эффективности остальная часть составляющих уравнения обрабатывается явно. При негидростатическом подходе коррекция давления решается с помощью метода сопряженного градиента, который осуществляется путем генерации векторных последовательных итераций.

Численный расчет годовой эволюции термодинамического режима вод Обской губы невозможен без учета процессов ледообразования. Поэтому в расчетный комплекс Delft3D был включен модуль ICE. Термодинамический блок модуля ICE базируется на простых параметризациях процесса нарастания и таяния льда и формирования снежного покрова, предложенных Семтнером (Semtner) [5] и доработанных Вангом (Wang) [6] (рис. 1).

Динамический блок модуля ICE предназначен для расчета концентрации льда и его механического разрушения. Он представляет собой последнюю модификацию известной ледовой модели LIM (Louvain-la-Neuve sea Ice Model) [7], основанной на упруго-вязко-пластичной модели динамики морского льда [8]. Динамический блок описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_{ice}}{\partial t} + u_{ice} \frac{\partial u_{ice}}{\partial x} + v_{ice} \frac{\partial u_{ice}}{\partial y} - f v_{ice} = F_{x_ice} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial v_{ice}}{\partial t} + u_{ice} \frac{\partial v_{ice}}{\partial x} + v_{ice} \frac{\partial v_{ice}}{\partial y} + f u_{ice} = F_{y_ice} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (u_{ice} A)}{\partial x} + \frac{\partial (v_{ice} A)}{\partial y} = W_{wat_ice} \quad \text{при } 0 \leq A \leq 1 \\ \frac{\partial A H_{ice}}{\partial t} + \frac{\partial (u_{ice} A H_{ice})}{\partial x} + \frac{\partial (v_{ice} A H_{ice})}{\partial y} = W_{wat_ice} + Q_{air_ice} \end{cases}, \quad (5)$$

где u_{ice} , v_{ice} – составляющие скорости дрейфа льда, f – параметр Кориолиса, A – концентрация льда, H_{ice} – толщина льда, F_{x_ice} , F_{y_ice} – внешние силы, действующие на лед, W_{wat_ice} , Q_{air_ice} – силы сжатия и изменения объема.

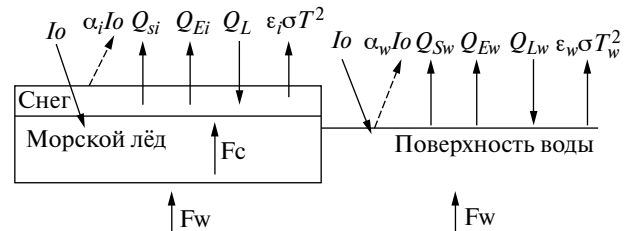


Рис. 1. Тепловой баланс на поверхности моря с учетом и без учета морского льда.

Fig. 1. Heat balance on the sea surface with and without sea ice.

Выполнение и оценка численных расчетов

На адаптированной модели Delft3D проводился расчет годовой эволюции термогидродинамического и ледового режима Обской губы. Для этого была построена криволинейная ортогональная расчетная сетка с пространственным разрешением от 4 км в Карском море и до 50 м в Обской губе.

Внешняя открытая граница расчетной области в Карском море на западе и северо-западе проходила по границе от о. Новая Земля, на севере и северо-востоке до о. Большой и Каменных островов – на востоке. На западе открытая боковая граница проходила по проливу Карские Ворота. На открытой границе задавались гармонические составляющие колебаний уровня и приливных течений 13-ти приливных волн. Такое удаление внешней границы расчетной области от входа в Обскую губу обусловлено отсутствием достаточно точных данных о распределении расхода воды на ее открытых границах. Также задавалась климатическая годовая динамика расхода р. Обь, р. Пур и р. Таз.

В качестве начальных условий для численных расчетов было выбрано среднеклиматическое распределение температуры и солености воды в августе в Карском море и Обской губе. Начальное распределение течений и положения уровня моря в расчетной области задавались нулевыми. Условия на поверхности раздела вода-воздух задавались в виде потоков с привлечением данных атмосферного реанализа ERA-interim. Эти атмосферные форсинги с трехчасовым временным шагом за расчетный период 2015–2016 гг. интерполировались в узле расчетной сетки.

Проверка качества результатов численных расчетов колебаний уровня моря и скоростей течения под действием периодических и непериодических вынуждающих сил проводилась путем сравнения полученных результатов с данными натурных наблюдений уровня моря и вертикального распределения течения, зафиксированных на автоматической донной станции (АДС) доплеровским измерителем AWAC. Запись данных на АДС выполнялась с дискретностью 10 мин в течение 1 г в районе Салмановского месторождения.

При сравнительном анализе результатов численных экспериментов и натурных наблюдений необходимо учитывать такой фактор, как существование различия в периодах пространственно-временного осреднения между этими данными. Наличие такого фактора наиболее сильно проявляется при сравнении гидрофизических параметров вод с большей пространственно-временной неоднородностью. В связи с этим наибольшие отличия между натурными и модельными данными проявляются в величинах скоростей и направлений течений, тогда как более инерционный ход колебаний уровня демонстрирует большую точность адаптации модели Delft3D к условиям Обской губы.

Для оценки точности численного расчета динамических характеристик был выбран летний период 2016 г. Это связано с особенностями нарастания льда в зимний период, что сильно влияет на определение величины уровня моря. Так, рис. 2 визуализирует ход колебания уровня моря в июле 2016 г., полученный как в ходе численных расчетов, так и в результате измерений с помощью AWAC. Колебания уровня характеризуются периодическими и непериодическими составляющими. Как хорошо видно из рисунка, модельные и натурные данные совпадают по фазе, а ошибка численных экспериментов проявляется только в амплитуде колебаний уровня.

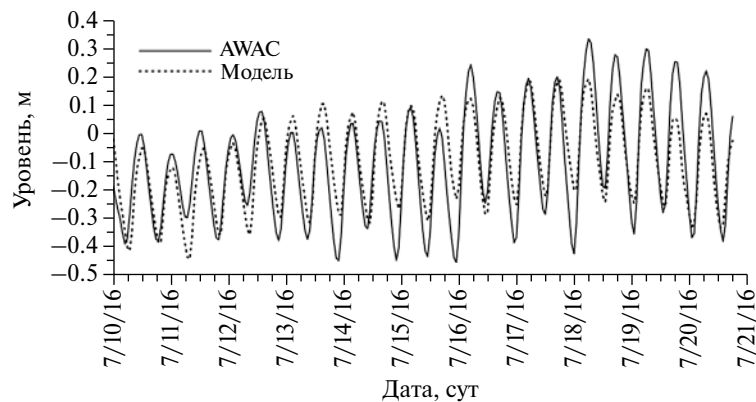


Рис. 2. Временной ход колебаний уровня моря по результатам численного эксперимента и наблюдений AWAC в июле 2016 г. в районе Салмановского месторождения.

Fig. 2. The time evolution of sea level oscillations according to the results of a numerical experiment and AWAC observations in July 2016 in the area of the Salmanovsky field.

Причем максимальная ошибка модельной величины уровня оказалась менее 30 см, а средняя погрешность расчета по данным, приведенным в таблице, не вышла за пределы 2.4 см, составив 12.6% от среднеквадратического отклонения (СКО) в наблюдаемых колебаниях уровня. Анализ ошибок в таблице показал, что средняя ошибка расчета уровня моря оказалась допустимой для проведения навигационных работ. При этом величина максимальной ошибки в расчете уровня требует дальнейшей настройки управляющих параметров модели Delft3D, чтобы обеспечить безопасное судоходство оперативной информацией о динамике колебаний уровня на наиболее сложных участках Обской губы.

Таблица

Оценка ошибки расчета колебаний уровня моря и параметров течения
Error estimate for calculating sea level oscillations and currents parameters

Параметр	СКО изм.	СКО мод.	Ср. ошибка	% СКО изм.
Уровень, см	19.6	14.6	2.4	12.6%
Скорость, см/с	21.4	14.4	2.48	17.2%
Направление, град	255	270	30,9	11.4%

Что касается характера изменения скоростей течений в рассматриваемый период времени по модельным и натурным данным, то рис. 3 и 4 наглядно демонстрируют проявление влияния полусуточных приливов на изменчивость величины и направления течений. На этих рисунках в параметрах течений выявляются также и осцилляции, имеющие непериодическую природу. Стоит отметить, что в летний сезон, характеризующийся паводковыми явлениями, значительное влияние на периодические колебания скорости течения вносит величина речного стока Оби.

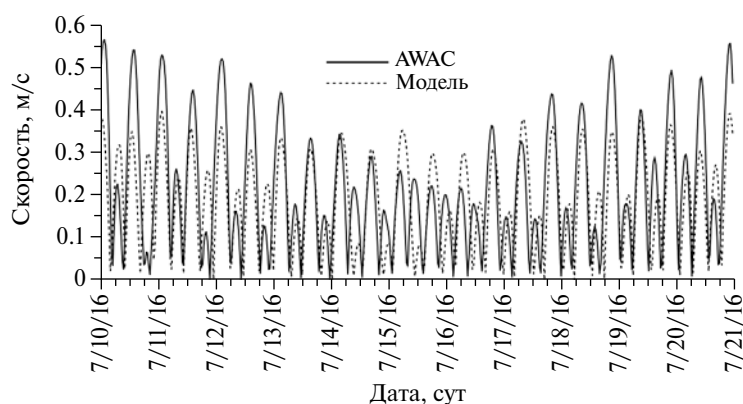


Рис. 3. Временной ход изменений величины скорости течений по результатам численного эксперимента и наблюдений AWAC в июле 2016 г. в районе Салмановского месторождения.

Fig. 3. The time evolution of current velocity value according to the results of a numerical experiment and AWAC observations in July 2016 in the area of the Salmanovsky field.

Недостаточность имеющихся данных по речным стокам в Обской губе отрицательным образом может сказываться на качестве результатов модельных расчетов величины скорости течений и ее ошибки, нивелируя разность между пиковыми величинами модуля скорости потока в период прилива и отлива. Тем не менее модель Delft3D адекватно описывает изменчивость направлений течений, хорошо согласуясь с данными наблюдений (рис. 4).

Модель также демонстрирует и удовлетворительную точность расчетов параметров скорости течения (таблица), при которой средняя ошибка расчета модуля скорости не превышает 2.48 см/с, составляя всего 17% от СКО измеренных значений интенсивности потока. Средняя ошибка в расчете направления

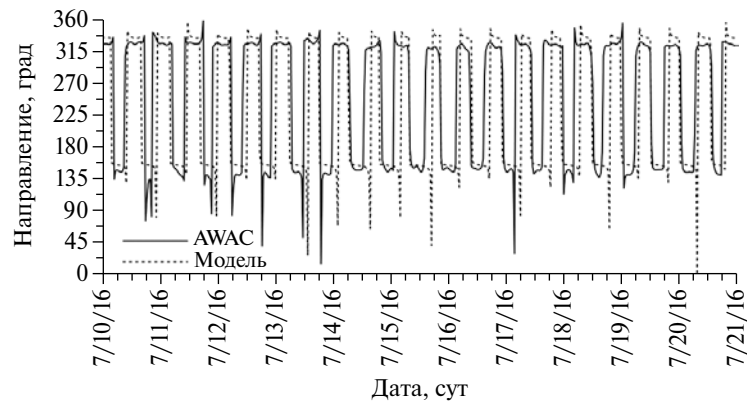


Рис. 4. Временной ход изменений направления течений по результатам численного эксперимента и наблюдений AWAC в июле 2016 г. в районе Салмановского месторождения.

Fig. 4. The time evolution of current direction variations according to the results of a numerical experiment and AWAC observations in July 2016 in the area of the Salmanovsky field.

течения еще меньше — 11.4% от СКО направления течения, измеренного с помощью AWAC, а ее разброс не выходит за рамки 30.9° . Имеющиеся на данный момент времени различия между модельными расчетами и натурными наблюдениями за скоростью течений можно связать и с качеством батиметрических данных, используемых в модели. К сожалению, из-за отсутствия доступной информации о донной топографии с необходимой пространственной детализацией, соответствующей дискретизации расчетной сетки модели, батиметрические данные брались из карт с грубым разрешением.

При рассмотрении моделирования ледовых условий в Обской губе можно отметить хорошую пространственно-временную согласованность расчета процесса ледообразования с данными наблюдений [9]. Так, на рис. 5, б отмечается, что ледообразование начинается с мелководной Тазовской губы. Это хорошо согласуется с наблюдением (рис. 5, а) не только по времени появления льда, но и по его толщине. К началу ноября 2015 г. на всей акватории расчетной области под действием атмосферных форсингов сформировался устойчивый ледовый режим как в расчетах (рис. 5, в), так и по данным наблюдений (рис. 5, г). При этом необходимо обратить внимание на то, что характер распределения толщины ледового покрова в расчетах практически совпадает с данными обработки спутниковых наблюдений. Некоторые отличия в границах распределения видов льда по толщине могут быть связаны со сдвигом в 2 сут фиксации расчета по отношению к наблюдению.

Процесс ледотаяния в Обской губе протекает гораздо интенсивнее, чем ледообразования. И если в начале июня лед покрывает всю акваторию залива, то к началу июля 2016 г. Обская губа практически полностью освобождается ото льда. Из-за отсутствия информации о характере ледотаяния в Обской губе во второй половине июня 2016 г. сравнение модельных расчетов с данными наблюдений пространственного распределения льда ограничивается первыми числами июня. В эти сроки расчетное распределение толщины льда (рис. 5, е) также хорошо согласуется с наблюдениями (рис. 5, д).

Оценка точности расчета годовой эволюции толщины льда была проведена для района мыса Каменный Обской губы, где в 2015–2016 гг. проводились прямые измерения толщины льда в отдельные периоды времени. Модель адекватно описала наступление периода ледообразования и время освобождения бассейна ото льда, хорошо согласуясь с натурными данными. Однако процесс нарастания льда по данным численного эксперимента несколько отличается от наблюдаемого, что видно из рис. 6 по незначительно завышенным расчетным величинам толщины льда.

Как и в случае анализа погрешностей в расчете колебаний уровня и параметров скорости течений, ошибка расчетной толщины ледяного покрова по модели Delft3D также оказалась удовлетворительной, что приемлемо для моделей, используемых для полярных условий. Эта ошибка не превысила 10 см, причем ее наибольшие величины связаны со значительными толщинами льда. Процесс таяния ледяного покрова в численном эксперименте протекает ненамного быстрее, чем по натурным данным. Такой более высокий темп таяния может быть обусловлен отсутствием снежного покрова в модели, требующего введения дополнительной информации о распределении снежных осадков на

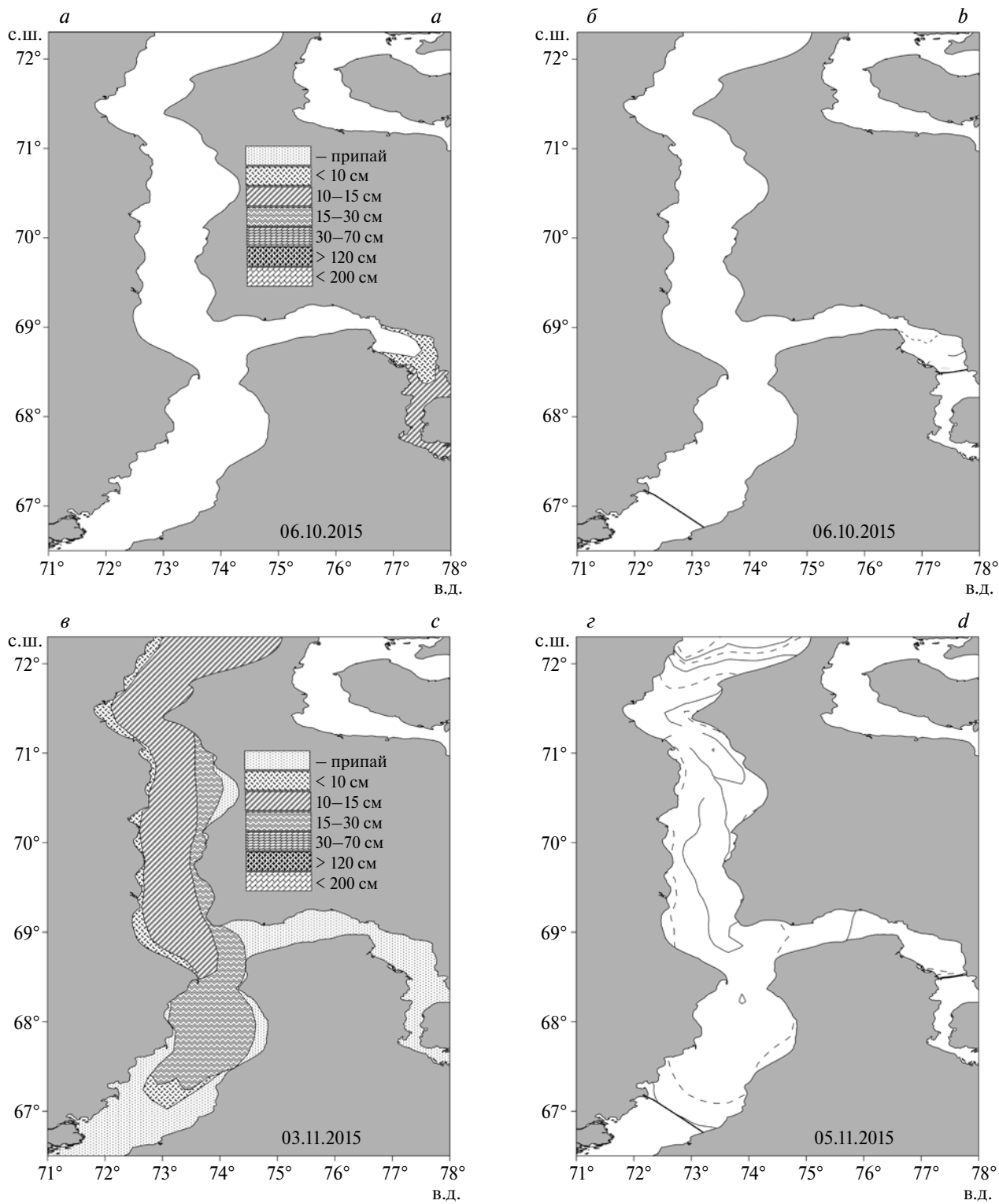


Рис. 5. Годовая эволюция распределения толщины льда в Обской губе (*a, в, д* – по данным наблюдений [8], *б, г, e* – по модельным расчетам).

Fig. 5. Annual evolution of the ice thickness distribution in the Ob Bay (*a, c, e* – according to the observations [8], *b, d, f* – according to model calculations).

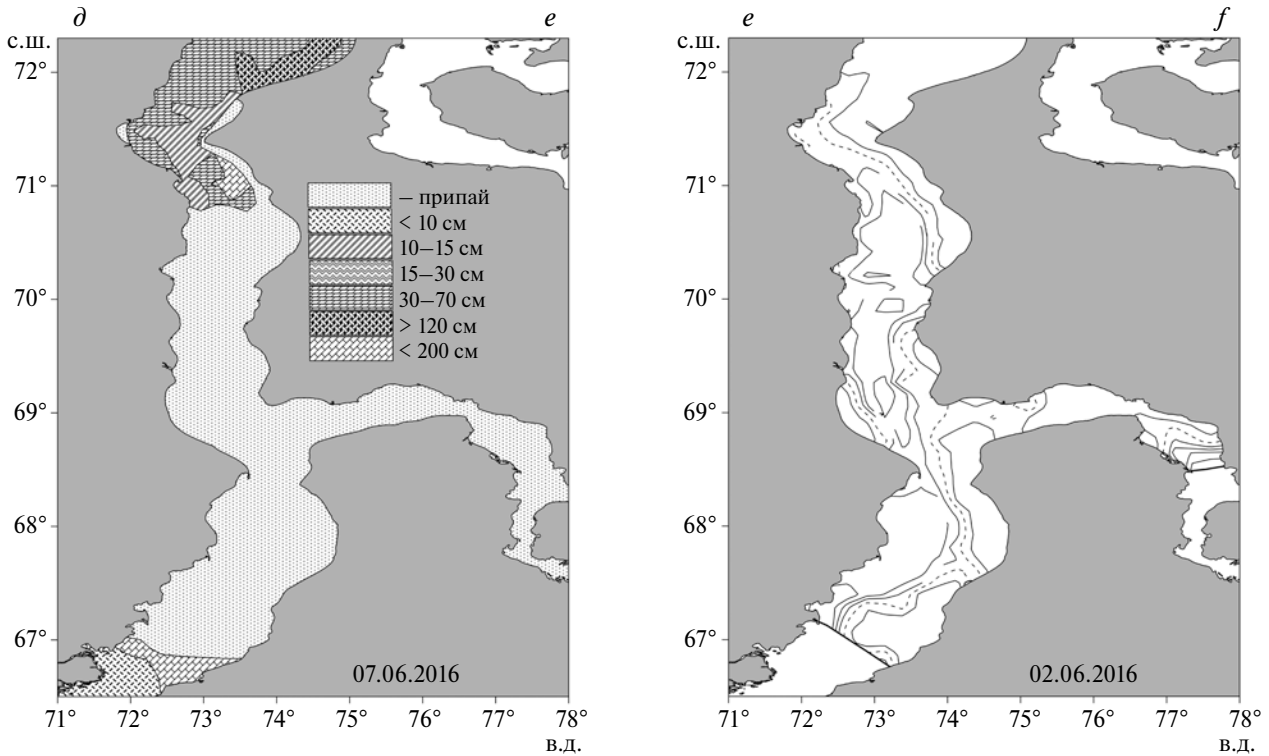


Рис. 5. (Окончание).

Fig. 5. (Ending).

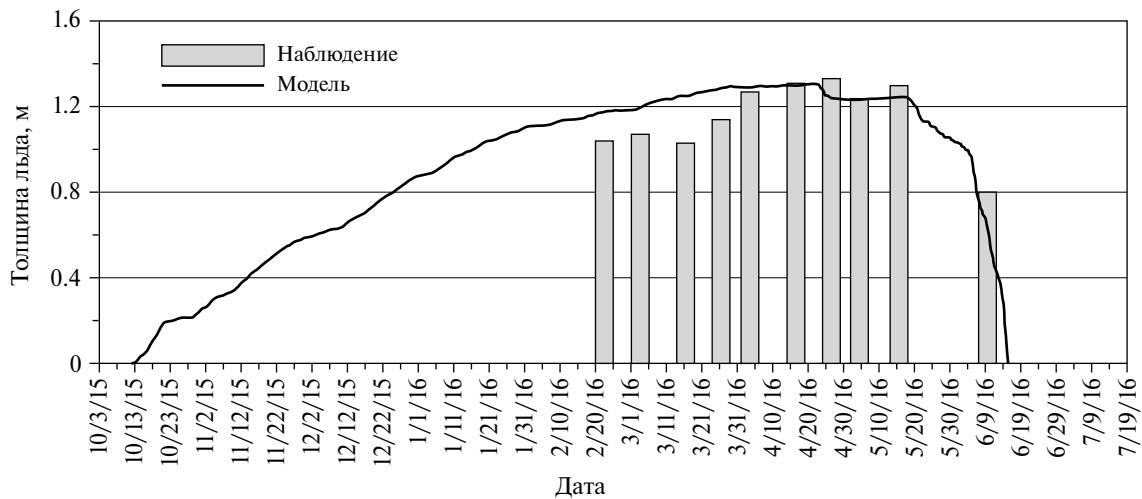


Рис. 6. Годовая эволюция и опорные измерения толщины льда в районе мыса Каменный.

Fig. 6. Annual evolution and points measurements of ice thickness in the area of Kamenny Cape.

поверхности льда в зависимости от ветровых условий и распределения торосистости. На акватории мыса Каменный адаптированная к условиям Обской губы модель Delft3D показала адекватное воспроизведение эволюции толщины ледяного покрова.

На основании вышеизложенного можно сказать, что в целом сравнительный анализ изменчивости расчетных величин с данными наблюдений продемонстрировал положительные возможности модельного комплекса Delft3D с высокой пространственной дискретизацией расчетной сетки для его использования на прибрежных морских акваториях Арктического региона. Наибольшие величины погрешностей в численных расчетах в основном связаны с качеством исходной информации, вводимой в модель.

Заключение

Для условий Обской губы был адаптирован модельный комплекс Delft3D. Данная конфигурация модели представляет собой синтез термогидродинамического блока Delft3D-FLOW с модулем ICE, предназначенным для моделирования процесса нарастания и таяния льда, а также расчета динамики, сплоченности и механического разрушения льда. Для воссоздания условий, характерных для полярных регионов, термодинамический блок модели был модернизирован за счет введения в него уравнения для расчета температуры замерзания воды в зависимости от солёности. Подбор значений управляющих параметров и выбор необходимых параметризаций подсеточных процессов позволил вывести данную конфигурацию модели на устойчивый режим работы и наиболее полно адаптировать к условиям высоких широт.

Проведенные численные эксперименты показали адекватное воспроизведение моделью гидрофизического и ледового режима Обской губы в течение расчетного периода 2015–2016 гг. Полученные в ходе расчетов данные были сопоставлены с имеющимися натурными наблюдениями, выполненными в Обской губе. По отдельным наиболее показательным параметрам, таким как скорость течения, колебания уровня моря и толщины ледяного покрова была проведена оценка погрешностей расчетов для демонстрации качества работы адаптируемой конфигурации модели. Выполненный сравнительный анализ эволюции выбранных параметров, полученных в результате численных экспериментов, с данными наблюдений продемонстрировал положительные возможности модельного комплекса Delft3D. Максимальные величины погрешностей расчета в основном зависят от качества задействованных в модельных расчетах исходных данных. Таким образом, адаптируемый к району Обской губы модельный комплекс Delft3D может быть использован для успешного разрешения ряда прикладных гидрометеорологических, морфологических и экологических задач в области освоения и эксплуатации данного Арктического региона.

Литература

1. *Вольцингер Н.Е., Андросов А.А., Клеванный К.А., Сафрай А.С.* Океанологические модели негидростатической динамики. Обзор // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т. 11, № 1. 2018. С. 3–20.
2. *Даньшина А.В.* Влияние дискретизации расчетной сетки на структуру гидродинамических полей // *Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»*. СПб.: Химиздат, 2018. С. 217–219.
3. *Архипов Б.В., Алабян А.М., Дмитриева А.А. и др.* Моделирование влияния морского канала к порту Сабетта на гидродинамический режим и солёность Обской губы // *ГеоРиск*. Т. XII, № 1. 2018. С. 46–58.
4. *Casulli V.* A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free surface flows // *International Journal Numerical Methods In Fluids* 30. 1999. P. 425–440.
5. *Semtner A.J.* A Model for the Thermodynamic Growth of Sea Ice in Numerical Investigations of Climate // *Journal of Physical Oceanography*. 1976. V. 6. P. 379–389.
6. *Wang J., Qinzhen Liu, Meibing Jin et al.* A Coupled Ice–Ocean Model in the Pan-Arctic and North Atlantic Ocean: Simulation of Seasonal Cycles // *Journal of Oceanography*. 2005. V. 61. P. 213–233.
7. *Vancoppenolle M., Bouillon S., Fichefet T. et al.* The Louvain-la-Neuve sea Ice Model // *Note du Pôle de modélisation de l’Institut Pierre-Simon Laplace*. 2012. N 31. 89 p.
8. *Hunke E.C., Dukowicz J.K.* An Elastic–Viscous–Plastic Model for Sea Ice Dynamics // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. V. 27. P. 1849–1867.
9. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. Региональные ледовые карты Евразийской Арктики. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (дата обращения: 17.02.2018).

References

1. *Voltzinger N.E., Androsov A.A., Klevanny K.A., Safray A.S.* Oceanological Models of Non Hydrostatic Dynamics: A Review. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 1, 3–20 (in Russian).
2. *Danshina A.V.* The influence of calculating grid discretisation on the hydrodynamic fields structure. *Trudy II Vserossiyskoy konferentsii “Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya”*. SPb., Khimizdat, 2018, 217–219 (in Russian).
3. *Arhipov B.V., Alabyan A.M., Dmitrieva A.A. et al.* Modeling of the navigation canal to the port of Sabetta influence on the Ob gulf hydrodynamics and salinity. *GeoRisk*. 2018, XII, 1, 46–58 (in Russian).

4. Casulli V. A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free surface flows. *International Journal Numerical Methods In Fluids* 30. 1999, 425–440.
5. Semtner A.J. A Model for the Thermodynamic Growth of Sea Ice in Numerical Investigations of Climate. *Journal of Physical Oceanography*. 1976, 6, 379–389.
6. Wang J., Qinzhen Liu, Meibing Jin et al. A Coupled Ice-Ocean Model in the Pan-Arctic and North Atlantic Ocean: Simulation of Seasonal Cycles. *Journal of Oceanography*. 2005, 61, 213–233.
7. Vancoppenolle M., Bouillon S., Fichefet T. et al. The Louvain-la-Neuve sea Ice Model. *Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace*. 2012, 31, 89 p.
8. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An Elastic–Viscous–Plastic Model for Sea Ice Dynamics. *Journal of Physical Oceanography*. 1997, 27, 1849–1867.
9. Arctic and Antarctic Research Institute. Regional ice charts of the Eurasian Arctic URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (date of access: 17.02.2018) (in Russian).