

Моделирование проникновения солености в Обскую губу с использованием криволинейных сеток

Б. В. Архипов*, Д. А. Шапочкин

Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, 119333, Москва, Россия

*Контактный автор: Архипов Борис Витальевич, e-mail: arh12.bor12@yandex.ru

Поступила 30 сентября 2021 г., доработана 25 марта 2022 г., принята в печать 31 марта 2022 г.

Рассмотрена задача проникновения солености в Обскую губу и влияния на него морского канала в Обском баре. Возможно, единственным методом решения такой задачи является математическое моделирование, которое осуществляется на основе трехмерной модели геофизической гидродинамики с учетом турбулентных механизмов вертикального перемешивания. При наличии “малого параметра” в виде канала решение выполнено на криволинейной ортогональной сетке, которая сгущается в области канала. Сравниваются результаты расчетов и наблюдений для экспедиции 1993 г. Дополнительно проведено сравнение результатов расчетов на декартовой сетке с постоянными шагами 3000 и 1500 м и криволинейной сетке с минимальными шагами 200 и 100 м. Показано, что результаты в разных вариантах расчетов близки.

Ключевые слова: математическое моделирование, криволинейные сетки, интрузия солености.

Цитирование: Архипов Б.В., Шапочкин Д.А. Моделирование проникновения солености в Обскую губу с использованием криволинейных сеток. Вычислительные технологии. 2022; 27(4):4–14. DOI:10.25743/ICT.2022.27.4.002.

Введение

Настоящее исследование является продолжением работы [1]. При изучении влияния морского канала и нарушения сплошности бара на экологическое состояние Обской губы среди всех параметров наиболее показательным считается соленость [1–5]. Интрузия (проникновение) соленой воды в Обскую губу — классическая задача взаимодействия соленых вод моря и пресных вод, поступающих из впадающих рек. В эстуарии эти воды смешиваются, и в области смешения возникает размытая граница (фронт) в виде соленого клина. В поверхностном слое текут более пресные воды, а в придонных слоях более соленые воды проникают в глубь эстуария. Для учета различных масштабов изменчивости в положении соленого клина требуются, вообще говоря, модели разной степени детальности и сложности, поскольку расчеты приходится проводить как для длинных, так и для коротких интервалов времени. Сложность задачи заключается, с одной стороны, в необходимости соединения двух пространственных масштабов (малого, связанного с размером канала, и большого, связанного с размером эстуария), а с другой — в необходимости рассмотрения различных временных масштабов.

Морской канал находится в северной части Обской губы [1, 2], он вытянут с юга на север у мористой границы Обской губы между восточным берегом п-ова Ямал и западным п-ова Явай (северная оконечность Гыданского п-ова). Мористая граница Обской губы характеризуется наличием бара с глубинами менее 11 м. Расположен бар между $72^{\circ}10'$ и $72^{\circ}32'$ с. ш. Далее глубины возрастают до 15–20 м. Для увеличения судопропускных возможностей в районе бара вдоль существующего фарватера проведены дноуглубительные работы между изобатами 14 м. Протяженность подходного морского канала составляет около 50 км, его ширина около 300 м и средняя глубина 4 м.

Цель моделирования — выяснение влияния морского канала на гидродинамические и термохалинные условия Обской губы. Для моделирования выбрана область, показанная на рис. 1. Открытая граница области проходит несколько севернее широты мыса Львова, южная и восточные границы находятся в устьевых областях рек Оби и Таза. Использование большей области не реалистично из-за слишком большого числа ячеек сетки, сильного ограничения на шаг по времени из-за условия Куранта, связанного с большой глубиной Карского моря и сложностью протекающих в нем процессов [3–9].

При исследовании проникновения солёности в глубь Обской губы необходимо ранжировать различные природные факторы, влияющие на этот процесс. Если рассматривать постановку в локальном варианте, то основную роль играют сток рек, штормовые нагоны (уровень моря, солёность) и внутригодовая модуляция приливных характеристик на северной границе. Обычно при моделировании проникновения солёности в эстуарий учитывают только солёность, пренебрегая, например, тепловыми процессами [10]. Поэтому в настоящем моделировании рассматриваются воздействия на открытой северной границе для задания граничных условий (ГУ) в виде приливных и синоптических колебаний уровня моря и солёности, в области впадения рек задается приток пресных речных вод, на поверхности — ветровое воздействие [7–9].

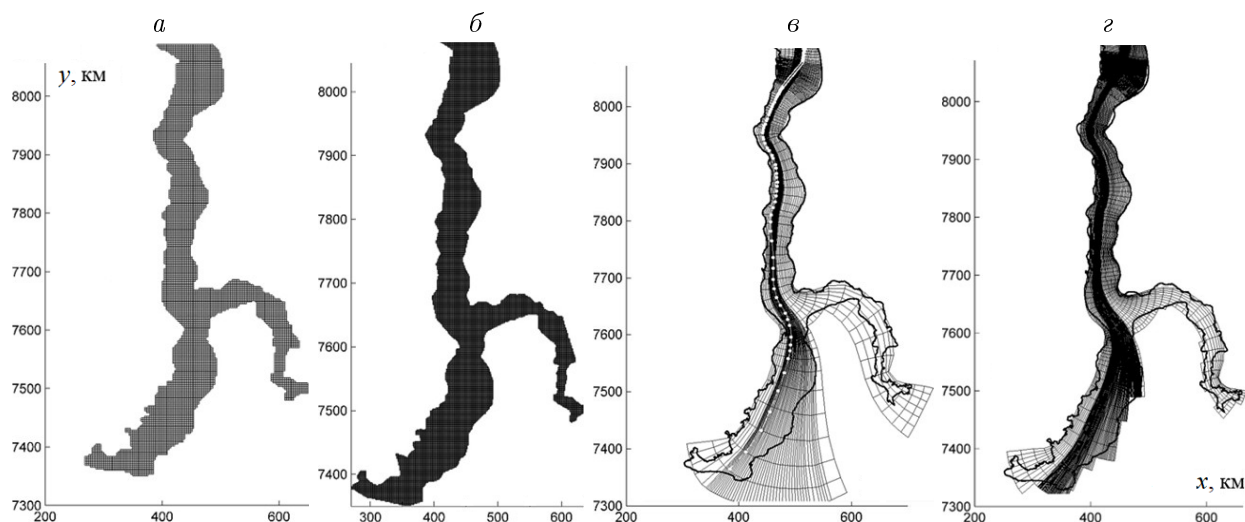


Рис. 1. Область исследования: декартова сетка 132×248 с шагом 3000 м (а); декартова сетка 266×496 с шагом 1500 м (б); криволинейная сетка 62×120 с минимальным шагом 200 м и указанием продольно вертикального разреза, проходящего по каналу (в); криволинейная сетка 166×346 с минимальным шагом 100 м (г)

Fig. 1. Research area: Cartesian grid 132×248 with step 3000 m (a); Cartesian grid 266×496 with step 1500 m (б); curved grid 62×120 with a minimum step of 200 m, indicating a longitudinally vertical section passing along the channel (в); curved grid 166×346 with a minimum step of 100 m (г)

Используется трехмерная модель гидродинамических и термохалинных процессов Delft3D, которая находится в открытом доступе в Интернете [11]. На предыдущих этапах работы для исследования процессов в Карском море и его заливах использовались различные модели [12]. На данном этапе выбрана Delft3D по причине высокой технологичности (детальной разработанности препроцессорной подготовки и постпроцессорной обработки данных), наличия различных моделей рассмотрения процессов вертикального турбулентного перемешивания [10, 13, 14] и др. В настоящей работе сравниваются результаты расчетов, выполненных на декартовой и криволинейной сетках. Расчеты проведены для выяснения адекватности описания (в глобальном смысле) ключевых особенностей батиметрии в разных подходах, как без учета наличия канала, так и с каналом для оценки получаемого решения на криволинейной сетке с большим сгущением в области канала и грубым описанием в области, далекой от канала. Ясно, что учет канала возможен только при использовании криволинейной сетки и/или вложенных сеток. Новым также является сравнение поля солёности на разрезе вдоль Обской губы, полученного при моделировании и в 49-м рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Дмитрий Менделеев» для периода 19–27 сентября 1993 г. [15].

1. Расчетная область и дискретное представление

Для сравнения проникновения полей солёности с учетом и без учета канала расчеты проводились на криволинейной сетке 62×120 ячеек, сгущающейся в области канала (рис. 1), с минимальной шириной ячейки в области траншеи около 200 м. Поскольку траншея проходит под значительным углом по отношению к линиям сетки, она аппроксимируется из нескольких ячеек. Ширина траншеи при этом варьируется от 600 до 900 м (3–5 ячеек), т. е. фактически превышает проектную величину в 2–3 раза. Иными словами, в работе рассматривается «худший» сценарий, результаты которого являются некоторой оценкой сверху для влияния канала. С целью сравнения и проверки сходимости численных решений расчеты выполнены на криволинейной сетке 166×346 с минимальным шагом 100 м.

Дополнительно расчеты проводились на декартовой прямоугольной сетке 132×248 ячеек с шагом 3000 м, а также на декартовой сетке 266×496 с шагом 1500 м (рис. 1). Разрешение сетки по вертикали в расчетных вариантах составляло 12 слоев с толщиной около 2.3 м. В реальности ширина канала по расстоянию между изобатами 14 м составляет 225 м, по изобате 12 м — около 450 м, для изобаты 10 м экстраполяция дает расстояние около 710 м. Отметим, что при шаге 200 м из условия Куранта получаем

$$\Delta t < \frac{200}{\sqrt{9.8 \cdot 25}} \sim 13 \text{ с.}$$

2. Сравнение результатов расчетов на декартовой и криволинейной сетках

Степень сгущения сетки можно оценить отношением минимального размера ячейки в области канала, который составляет около 200 м, к максимальному размеру, который более 30 км. Это отношение равно 0.006. Возникает вопрос оценки получаемого решения на криволинейной сетке с таким большим сгущением. В работе расчеты на декартовых сетках 132×248 и 266×496 с шагами 3000 и 1500 м соответственно сравниваются с расчетами на криволинейных сетках (62×120 и 166×346 ячеек с минимальными шагами

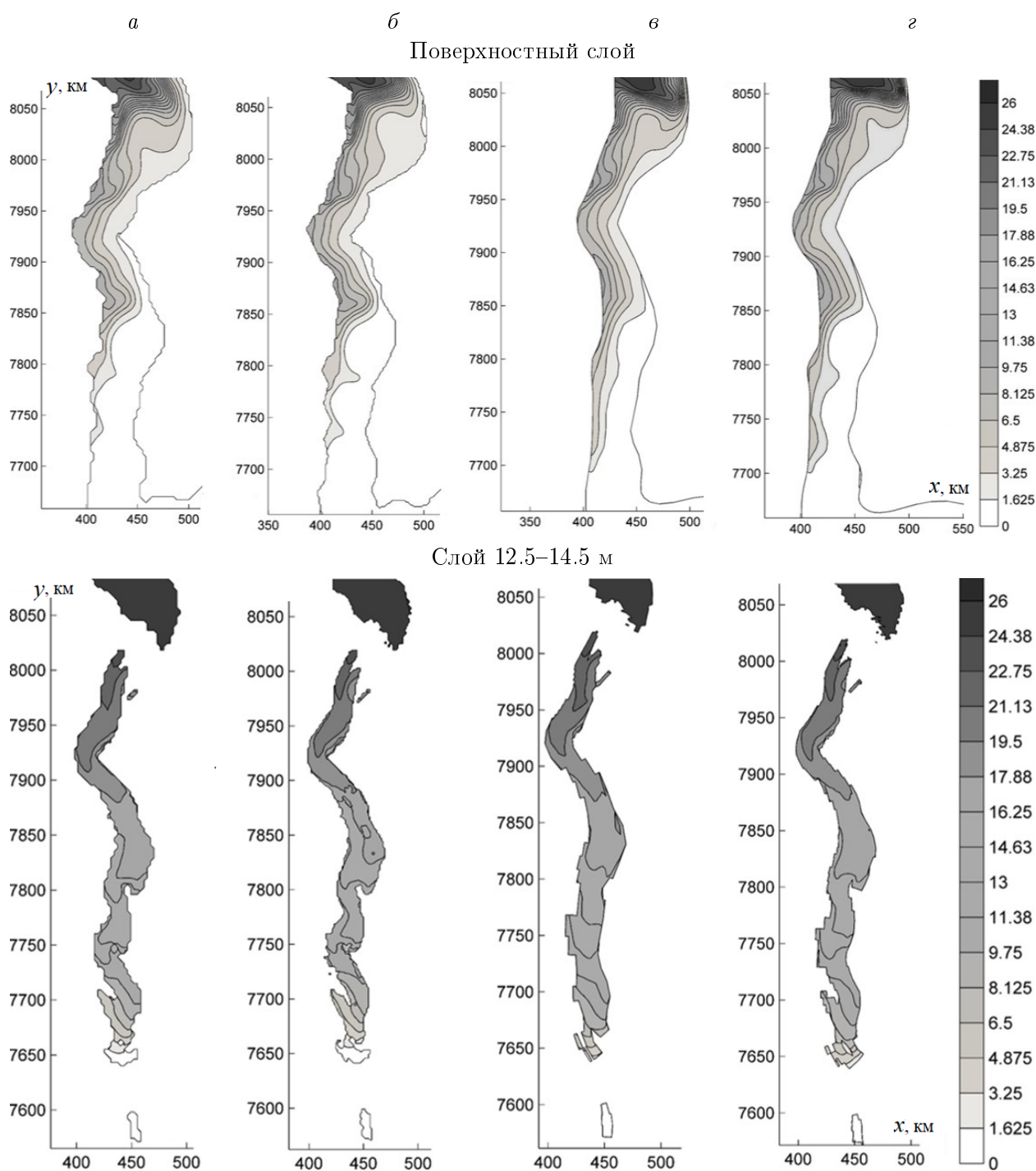


Рис. 2. Распределение солёности воды без учета канала в поверхностном слое (вверху) и в слое на глубине 12.5–14.5 м (снизу) на декартовой сетке 132×248 с шагом 3000 м (а), на декартовой сетке 266×496 с шагом 1500 м (б), на криволинейной сетке 62×120 с минимальным шагом 200 м (в), на криволинейной сетке 166×346 с минимальным шагом 100 м (г)

Fig. 2. Water salinity distribution without a channel in the surface layer on a 132×248 Cartesian grid with a step of 3000 m (a), on a Cartesian grid 266×496 with a step of 1500 m (b), on a curved grid 62×120 with a minimum step of 200 m (v), on a curved grid 166×346 with a minimum step of 100 m (z)

200 и 100 м соответственно). Ясно, что учет канала возможен только при использовании криволинейных и/или вложенных сеток. Расчеты проведены для выяснения, какие результаты в масштабе всей области без фокусирования на локальных особенностях дадут оба расчета (на декартовой и криволинейной сетках).

Расчеты выполнены в двух вариантах — с обычным шагом и шагом, уменьшенным в два раза, для проверки сходимости численных решений при уменьшении шага сетки. Эти расчеты проведены как без учета канала (варианты *а–г*) для выяснения адекватности описания (в глобальном смысле) ключевых особенностей батиметрии в разных подходах, так и с каналом (варианты *в, г*) для оценки получаемого решения на криволинейной сетке с ее большим сгущением в области канала и грубым описанием в области, далекой от канала.

Характерный интервал расчета 0.5–2 года. Один расчет (7.5 мес. модельного времени) на декартовой сетке 132×248 ячеек с шагом 3000 м занимает около 3 ч на процессоре Intel(R) Core (TM) i7-7740X CPU @ 4.30GHz. Один расчет (6.0 мес. модельного времени) на декартовой сетке 266×496 ячеек с шагом 1500 м требует около 20 ч процессорного времени. Один расчет (7.5 мес. модельного времени) на криволинейной сетке 62×120 ячеек с минимальным шагом 200 м занимает около 1.8 сут. процессорного времени, на сетке 166×346 с шагом 100 м — около 15 сут.

Введение вложенной сетки не сокращает время расчетов, хотя добавляет технических сложностей. Вообще говоря, работа [1] и настоящее исследование являются достаточно новыми и не претендуют на исчерпывание рассматриваемой проблемы. Для более точного решения подобных задач требуется дальнейшее усовершенствование моделей и алгоритмов, а также разработка параллельных версий.

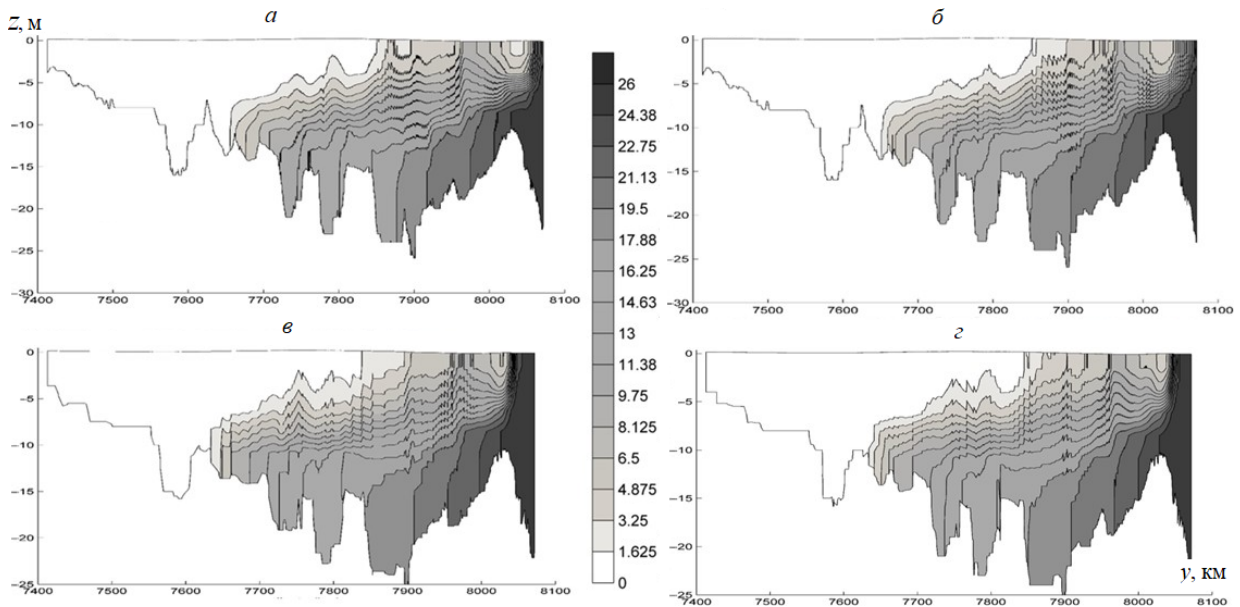


Рис. 3. Распределение солености воды без канала на продольно-вертикальном разрезе (см. рис. 1, в) на декартовой сетке 132×248 с шагом 3000 м (*а*), на декартовой сетке 266×496 с шагом 1500 м (*б*), на криволинейной сетке 62×120 с минимальным шагом 200 м (*в*), на криволинейной сетке 166×346 с минимальным шагом 100 м (*г*)

Fig. 3. Water salinity distribution without a channel on a longitudinal-vertical section (see Fig. 1, в) on a 132×248 Cartesian grid with a step of 3000 m (*а*), on a Cartesian grid 266×496 with a step of 1500 m (*б*), on a curved grid 62×120 with a minimum step of 200 m (*в*), on a curved grid 166×346 with a minimum step of 100 m (*г*)

Отметим, что расчет в данном случае проводился с 01.12.1968 по 15.06.1969, т.е. несколько больше полугода. Результаты сравнения на 06.05.1969 приведены на рис. 2, 3. В целом наблюдается как качественное, так и количественное подобие результатов расчетов.

3. Сравнение расчетов с данными наблюдений

Моделирование проводилось на один год с 01.01.93 по 30.12.93 на декартовой сетке 132×248 ячеек с шагом 3000 м (см. рис. 1) и занимало около 5 ч процессорного времени. В расчетах для описания вертикальной турбулентной вязкости и диффузии использовалась $k-\varepsilon$ -модель, а коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии составили 7 и 10 $\text{м}^2/\text{с}$ соответственно. Коэффициент Шези равен 65. Нужно отметить, что продвижение соленого клина в модели чувствительно к величине горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии, так что увеличение этих параметров приводит к уменьшению его проникновения в губу, а уменьшение — к обратному эффекту. Используемые значения подобраны исходя из наибольшего подобия с наблюдениями. На открытой северной границе задавался прилив в виде набора приливных гармоник (Q1,

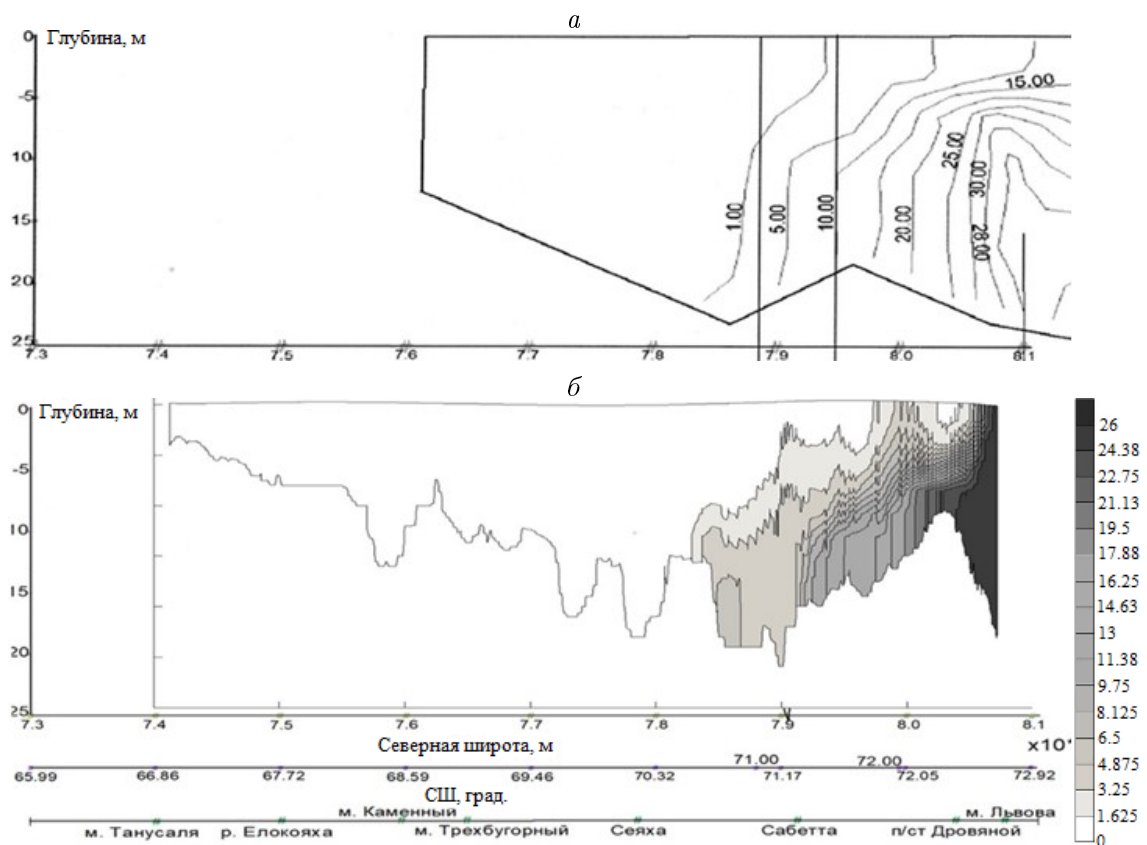


Рис. 4. Поле солёности вдоль Обской губы на разрезе, полученное в 49-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” [15] (а) и в результате моделирования (б). В районе порта Сабетта значение 5–6 ‰ на дне и около 1 ‰ на поверхности

Fig. 4. Salinity field in the section along the Gulf of Ob obtained during cruise 49 of the R/V Dmitriy Mendeleev [15] (a) and in simulation (b). In Sabetta region, the value is 5–6 ‰ at the bottom and about 1 ‰ at the surface

O1, M1, K1, MNS2, N2, M2, S2, 2SM2), полученных на основе гармонического анализа из наблюдений, дополнительно задавалась соленость, меняющаяся в течение года. В области впадения рек (Обь, Надым, Пур, Таз) задавался сток пресных вод по данным с 1936 по 2019 г. Ветровое воздействие в рассматриваемом варианте не задавалось за неимением данных в архивах за 1993 г. [7–9]. Сравнение поля солености на разрезе вдоль Обской губы, полученного в результате моделирования и в 49-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” для периода 19–27 сентября 1993 г. [15], приведено на рис. 4. В районе пос. Сабетта соленость около 5–6 ‰ на дне и около 1 ‰ на поверхности как в наблюдениях, так и в расчетах.

Необходимо отметить, что данные экспедиций очень лаконичные, например, для 1993 г. в [15] по солености приведена одна картинка. Разрез нарисован схематично, данных для задания граничных условий не хватает. С учетом этих обстоятельств результаты сравнения выглядят удовлетворительно.

4. Сравнение расчетов с каналом и без канала

Для сравнения выбран 1969 г., хотя канал построен в 2015 г., поскольку 1969 г. считается экстремальным с точки зрения проникновения солености в Обскую губу из-за малого стока в предпаводковый период [1]. Поле глубин в области канала показано на рис. 5. На рис. 2 и 3, а, б приведено распределение солености воды на 06.05.1969 в варианте без канала, а на рис. 6 и 7 — с каналом на тот же период. В целом в расчетах наблюдается как качественное, так и количественное подобие результатов.

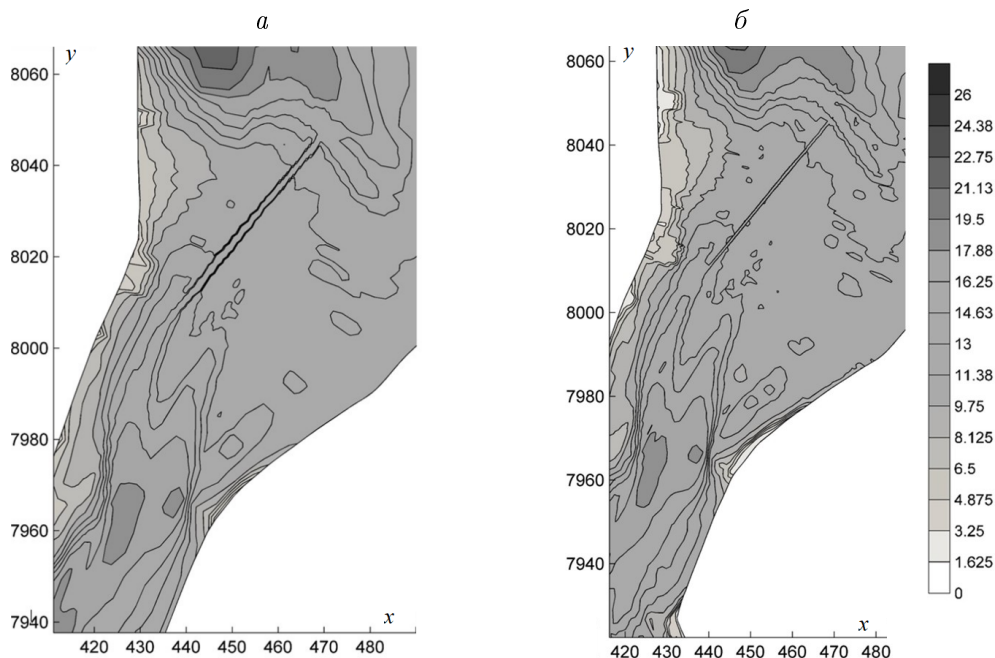


Рис. 5. Отображение канала на криволинейной сетке 62×120 с минимальным шагом 200 м (а) и сетке 166×346 с шагом 100 м (б)

Fig. 5. Channel mapping on the curved grid 62×120 with a minimum step of 200 m (a) and on the grid 166×346 with a step of 100 m (b)

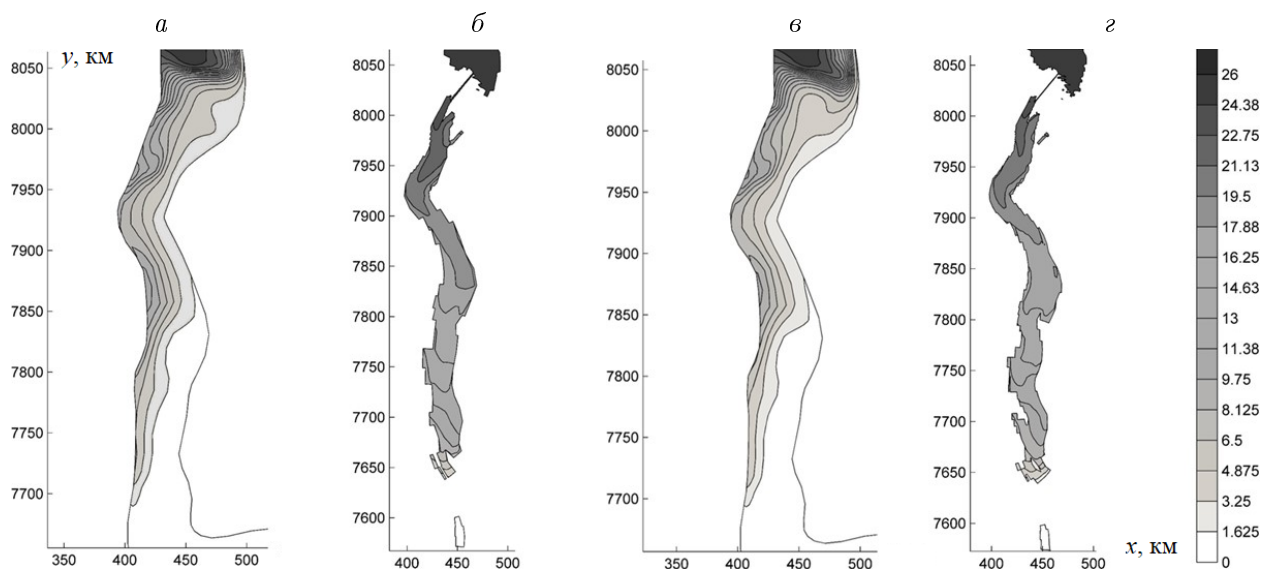


Рис. 6. Распределение солености воды на 06.05.1969 в вариантах с каналом в поверхностном слое на криволинейной сетке 62×120 с минимальным шагом 200 м (*а*), в слое 12.5–14.5 м (*б*), на криволинейной сетке 166×346 с минимальным шагом 100 м в поверхностном слое (*в*), в слое 12.5–14.5 м (*г*)

Fig. 6. Water salinity distribution on 06.05.1969 in the surface layer on a 62×120 curved grid with a minimum step of 200 m with a channel (*a*), in a 12.5–14.5 m layer with a channel (*б*), on a 166×346 curved grid with with a minimum step of 100 m in the surface layer with a channel (*в*), in a layer of 12.5–14.5 m with a channel (*г*)

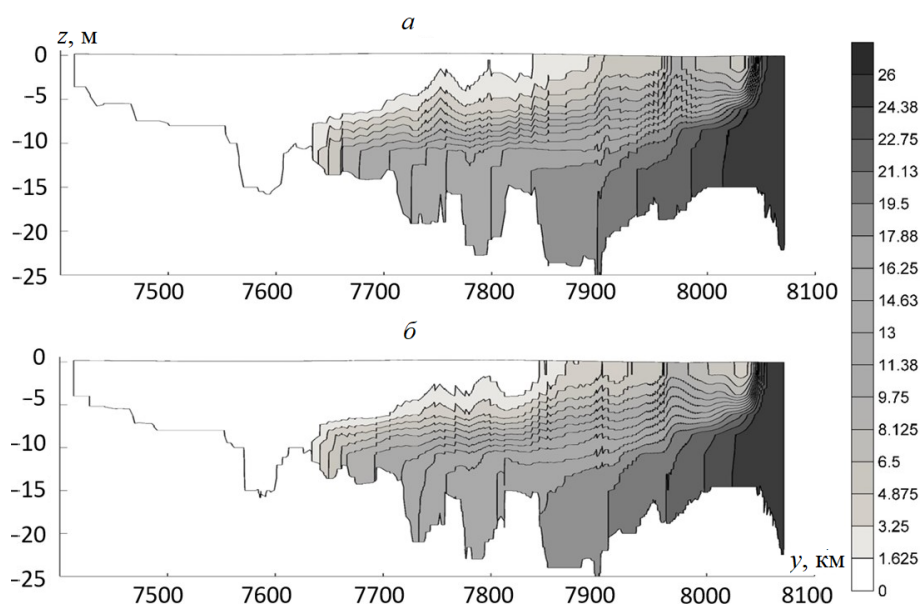


Рис. 7. Распределение солености воды на 06.05.1969 на разрезе с каналом: криволинейные сетки 62×120 с минимальным шагом 200 м (*а*) и 166×346 с минимальным шагом 100 м (*б*)

Fig. 7. Water salinity distribution on 06.05.1969 on the section with the channel: the 62×120 curved grid with a minimum step of 200 m (*a*) and the 166×346 curved grid with the minimum step of 100 m (*б*)

Выводы

В целях верификации модели проведено попарное сравнение полученных полей солености в результате моделирования и наблюдениях в 49-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” на разрезе вдоль Обской губы [15]. В районе порта Сабетта соленость 5–6 ‰ на дне и около 1 ‰ на поверхности в расчетах и наблюдениях. С учетом неопределенности входных данных в ретроспективных расчетах совпадение удовлетворительное. Проведено сравнение результатов расчетов на декартовой и криволинейной сетках. Расчеты выполнены как без учета канала для выяснения адекватного описания (в глобальном смысле) ключевых особенностей батиметрии в разных подходах, так и с каналом для оценки получаемого решения на криволинейной сетке с ее большим сгущением в области канала и грубым описанием в области, далекой от канала. Ясно, что учет канала возможен только при использовании криволинейной сетки и/или вложенных сеток. Сравнение расчетов с каналом и без канала можно увидеть на рисунках, где показаны плановые и вертикальные распределения солености. В целом приведенные результаты свидетельствуют о том, что роль канала незначительна с практической точки зрения проникновения солености в Обскую губу и не может привести к кардинальной перестройке поля солености.

Список литературы

- [1] Архипов Б.В., Алабян А.М., Дмитриева А.А., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. Моделирование влияния морского канала к порту Сабетта на гидродинамический режим и соленость Обской губы. Геориск. 2018; 12(1):46–58.
- [2] Книжников А.Ю., Голубчиков С.Н., Зайцева Ю.Б. О возможных экологических последствиях реализации проекта “Ямал5. СПГ”. Рыбное хозяйство. 2013; (6):18–21.
- [3] Экспедиционные исследования ВНИИОкеангеология в Арктике, Антарктике и Мировом океане в 2005 году. Ежегодный обзор. СПб.: ВНИИОкеангеология; 2006: 122.
- [4] Виноградова Е.Л. Об изменчивости биогенного стока рек Арктического бассейна. Океанология. 2008; 48(4):527–536.
- [5] Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 7. Карское море. Л.: Гидрометеиздат; 1986: 97.
- [6] Лоция Карского моря Обь-Енисейского района. Ч. 2. СПб.: Гос. упр. навигации и океанографии МО РФ; 2001: 292.
- [7] Harms I.H., Karcher M.J. Modelling the seasonal variability of circulation and hydrography in the Kara Sea. Journal of Geophysical Research. 1999; 104(C6):13431–13448.
- [8] Harms I.H., Hübner U., Backhaus J.O., Kulakov M., Stanovoy V., Stepanets O.V., Kodina L.A., Schelitzer R. Salt intrusions in Siberian river estuaries: observations and model experiments in Ob and Yenisey. R. Stein, K. Fahl, D.K. Fütterer, E.M. Galimov, O.V. Stepanets (Eds.). Siberian river run-off in the Kara Sea. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science; 2003: 27–46.
- [9] Arkhipov B.V., Solbakov V.V., Tsvetsinsky A.S. Hydrothermodynamic model of the Ob and Tas rivers estuary. Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu; USA; May 25–30, 1997; (3):772–777.

- [10] Oey L.-Y., Mellor G.L., Hires R.I. A three-dimensional simulation of the Hudson—Raritan estuary. Part I: description of the model and model simulations. *Journal of Physical Oceanography*. 1985; (15):1676–1692.
- [11] Delft3D-FLOW user manual. Netherlands: Deltares; 2013: 257. Available at: www.deltresssystem.nl.
- [12] The Princeton ocean model. The program in atmospheric and oceanic sciences (AOS). Princeton University; 2010; (3):160.
- [13] Burchard H., Baumert H. On the performance of a mixed-large model based on the $k - \varepsilon$ turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*. 1995; 100(C5):217–225.
- [14] Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. Моделирование турбулентного рассеивания загрязняющих веществ в морской среде. *Сообщения по прикладной математике*. М.: ВЦ РАН; 2005: 52.
- [15] Буренков В.И., Васильков А.П. О влияние материкового стока на пространственное распределение гидрологических характеристик вод Карского моря. *Океанология*. 1994; (5):652–661.

Modelling of salinity penetration into the Ob bay using curved meshes

АРХИПОВ БОРИС В.*, ШАПОЧКИН ДМИТРИЙ А.

Federal Research Centre “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 119333, Moscow, Russia

*Corresponding author: Arkhipov Boris V., e-mail: arh12.bor12@yandex.ru

Received September 30, 2021, revised March 25, 2022, accepted March 31, 2022.

Abstract

The paper considers the problem of salinity penetration into the Ob Bay and the influence of the sea channel in the Ob bar on it. The dimensions of the channel are about 50 km in length, 300–400 m in width and 4–5 m in depth, while the size of the Gulf of Ob is about 800 km in length, about 60 km wide and no more than 30 m deep in the northern part. It follows that the complexity of the problem under consideration lies, on the one hand, in the need to connect two spatial scales: a small one, associated with the size of the channel, and a large one, associated with the size of the estuary, and on the other hand, in the need to consider different time scales. Perhaps the only method of solving such a problem is the method of mathematical modelling, which is carried out on the basis of a three-dimensional model of geophysical hydrodynamics, taking into account the turbulent mechanisms of vertical mixing. To take into account the presence of a “small parameter” in the form of a channel, the solution is carried out on a curved orthogonal grid, which is condensed in the channel region. The degree of grid deformation can be estimated by comparing the minimum cell size in the channel area, which is about 200 m with the maximum cell size of 30 km or more. The paper compares calculations and observations for the 1993 expedition, additionally compares Cartesian grids with constant steps of 3000 m and 1500 m with calculations on a curved grid with a minimum step of 200 m and 100 m, it is shown that the results in different variants are close. Channel accounting is possible only when using a curved and/or nested grid. The comparison carried

out on a curved grid with a channel and without a channel showed that the influence of the channel is not significant and cannot cause a significant restructuring of the salinity field.

Keywords: mathematical modelling, curved grids, salinity intrusion.

Citation: Arkhipov B.V., Shapochkin D.A. Modelling of salinity penetration into the Ob bay using curved meshes. Computational Technologies. 2022; 27(4):4–14. DOI:10.25743/ICT.2022.27.4.002. (In Russ.)

References

1. **Arkhipov B.V., Alabyan A.M., Dmitrieva A.A., Solbakov V.V., Shapochkin D.A.** Modeling of the navigation canal to the port of Sabetta influence on the Ob gulf hydrodynamics and salinity. *Georisk*. 2018; 12(1):46–58. (In Russ.)
2. **Knizhnikov A.Yu., Golubchikov S.N., Zaitseva Yu.B.** On the possible environmental consequences of the “Yamal LNG” project. *Rybnoe Khoziaystvo*. 2013; (6):18–21. (In Russ.)
3. *Ekspeditsionnye issledovaniya VNIIOkeangeologiya v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane v 2005 godu. Ezhegodnyy obzor [Expedition research of VNIIOKEANGEOLGY in the Arctic, Antarctic and the World Ocean in 2005. Annual review]*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2006: 122. (In Russ.)
4. **Vinogradova E.L.** On the variability of biogenic runoff of rivers in the Arctic basin. *Oceanology*. 2008; 48(4):527–536. (In Russ.)
5. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR. T. 7. Karskoe more [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR. Vol. 7. Kara Sea]*. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1986: 97. (In Russ.)
6. *Lotsiya Karskogo morya Ob'-Eniseyskogo rayona [Sailing directions of the Kara Sea of the Ob-Yenisei region. Part 2]*. St. Petersburg: Gosudarstvennoe Upravlenie Navigatsii i Okeanografii MO RF; 2001: 292. (In Russ.)
7. **Harms I.H., Karcher M.J.** Modelling the seasonal variability of circulation and hydrography in the Kara Sea. *Journal of Geophysical Research*. 1999; 104(C6):13431–13448.
8. **Harms I.H., Hübner U., Backhaus J.O., Kulakov M., Stanovoy V., Stepanets O.V., Kodina L.A., Schelitzer R.** Salt intrusions in Siberian river estuaries: observations and model experiments in Ob and Yenisey. R. Stein, K. Fahl, D.K. Fütterer, E.M. Galimov, O.V. Stepanets (Eds.). *Siberian river run-off in the Kara Sea*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science; 2003: 27–46.
9. **Arkhipov B.V., Solbakov V.V., Tsvetsinsky A.S.** Hydrothermodynamic model of the Ob and Tas rivers estuary. *Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu; USA; May 25–30, 1997; (3):772–777.
10. **Oey L.-Y., Mellor G.L., Hires R.I.** A three-dimensional simulation of the Hudson—Raritan estuary. Part I: description of the model and model simulations. *Journal of Physical Oceanography*. 1985; (15):1676–1692.
11. *Delft3D-FLOW user manual*. Netherlands: Deltares; 2013: 257. Available at: www.deltressystem.nl.
12. *The Princeton ocean model. The program in atmospheric and oceanic sciences (AOS)*. Princeton University; 2010; (3):160.
13. **Burchard H., Baumert H.** On the performance of a mixed-large model based on the $k-\varepsilon$ turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*. 1995; 100(C5):217–225.
14. **Arkhipov B.V., Koterov V.N., Solbakov V.V., Shapochkin D.A.** Modelirovanie turbulentnogo rasseivaniya zagryaznyayushchikh veshchestv v morskoy srede. *Soobshcheniya po prikladnoy matematike [Modelling of turbulent dispersion of pollutants in the marine environment. Messages on applied mathematics]*. Moscow: VTs RAN; 2005: 52. (In Russ.)
15. **Burenkov V.I., Vasilkov A.P.** On the influence of continental runoff on the spatial distribution of hydrological characteristics of the waters of the Kara Sea. *Oceanology*. 1994; (5):652–661. (In Russ.)