

Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования

Н. А. Дианский¹, доктор физико-математических наук
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова,
Институт вычислительной математики РАН

В. В. Фомин²
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова,
Московский физико-технический институт (государственный университет)

В. М. Грузинов³, доктор географических наук,
И. М. Кабатченко⁴, доктор географических наук
Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова

Г. И. Литвиненко⁵, доктор технических наук
Научно-проектная компания «МорТрансНииПроект»

Проведена оценка изменений солёностного режима в районе проектируемого подходного канала в северной части Обской губы, которые могут быть вызваны изменением топографии дна в результате его строительства. С помощью численного моделирования проведены эксперименты на чувствительность солевого режима к изменению топографии за счет наличия подходного канала для максимального, средnekлиматического и минимального стоков рек Обь, Надым, Пур и Таз.

Эксперименты показывают, что наибольшее среднегодовое увеличение солёности за счет наличия канала происходит в районе его расположения. При удалении от канала его влияние существенно уменьшается.

Расчеты показали, что естественная межгодовая и внутригодовая изменчивость солёности существенно выше, чем ее изменение, вызванное наличием подходного канала.

Ключевые слова: циркуляция арктических морей, Обская губа, численное моделирование, гидрологический режим.

Введение

Возрастающая интенсивность антропогенного воздействия на крайне уязвимые экосистемы арктического шельфа в связи с добычей углеводородного сырья, развитием промышленности и судоходства [18] требует физико-географического и экологического мониторинга для анализа условий

рационального природопользования и устойчивого развития прибрежной зоны арктических морей [16]. Современные численные методы в ряде случаев позволяют проводить такой анализ еще на стадии проектирования гидротехнических сооружений, что должно приводить к существенной экономии средств при их строительстве. Настоящая статья посвящена именно такому исследованию влияния проектируемого подходного канала к морскому порту в районе поселка Сабетта на изменение солёностного режима в Обской губе.

Солёностный режим играет очень важную роль при формировании биопродуктивности Обской губы [13], являющейся водоемом исключительной

¹ e-mail: nikolay.diansky@gmail.com.

² e-mail: lihar_89@mail.ru.

³ e-mail: ok2a88@gmail.com.

⁴ e-mail: wavelab1@yandex.ru.

⁵ e-mail: litgi@mail.ru.

рыбохозяйственной ценности. Здесь находятся места нагула и зимовки таких ценных объектов промысла, как сибирский осетр, нельма, муксун, омуль, чир, сиг-пыжьян, пелядь, ряпушка, корюшка, налим и др. По запасам сиговых рыб (*Coregonidae*) бассейн Оби занимает первое место в мире [11].

Основные места скопления рыбы располагаются в южной и средней частях Обской губы. Это в основном связано с благоприятным для развития фитопланктона температурным режимом. Северная часть Обской губы используется слабо, что объясняется низкой температурой воды, высокой соленостью, резкими колебаниями температуры и солености. Приливо-отливные течения также создают неблагоприятную обстановку для пребывания сиговых рыб в северной части Обской губы. В северной части в основном находятся омуль, ряпушка и корюшка. Характерной особенностью южной части акватории Обской губы являются ежегодные заморы на значительной ее части. Причина дефицита кислорода — питание болотными и подземными водами из заболоченных пространств Западно-Сибирской равнины. Таким образом, основные рыбные запасы располагаются в средней и южной частях Обской губы — там, где соленость низка. Поэтому понятна озабоченность тем, что строительство подходного канала возле Сабетты в северной части Обской губы может повлиять на процесс формирования ихтиомассы всей Обской губы за счет того, что более соленые придонные воды могут проникать через этот канал из северной в среднюю часть Обской губы. Авторы настоящей работы ставили задачу оценить влияние проектируемого подходного канала к морскому порту в районе поселка Сабетта на изменение солености в Обской губе.

Гидрологический режим Обской губы в районе проектирования подходного канала

Обская губа — залив Карского моря, расположенный между полуостровами Гыданский и Ямал, составляющий единый водоем с примыкающей с востока Тазовской губой. При ширине 30—90 км и протяженности с юга на север на 750 км Обская губа вместе с Тазовской имеет площадь 62 тыс. км² [19; 1; 17]. Максимальная глубина не превышает 28—30 м, но на большей части акватории губы колеблется в диапазоне 10—15 м. Как самостоятельный объект Обская губа отличается сложным динамичным режимом в рамках двух подсистем — речной и морской, каждой из которых свойственны свои характерные особенности, особенно ярко проявляющиеся в период открытой воды. Район проектируемого канала расположен в северной части Обской губы (рис. 1).

Обская губа — эстуарий лиманного типа, микроприливной, сильно стратифицированный [13]. Осолоняемая с севера водами Карского моря, с юга Обская губа находится под мощным воздействием



Рис. 1. Район Обской губы с предполагаемым местом строительства проектируемого канала. Местоположение канала показано красной линией

стока реки Обь. Среднегодовой сток в море от всех рек, впадающих в Обскую губу, составляет 530,5 км³ [10]. Кроме Оби, которая формирует основной речной сток, в Обской губе выделяется еще несколько рек. В юго-восточную ее часть впадают Надым и Ныда. С западной стороны впадают небольшие речки Яда, Оя, Ивоча, Зеленая. В Тазовской губе, которая находится на востоке от Обской губы, выделяются две реки — Таз и Пур. Кроме Оби реками с самыми высокими стоками являются Надым, Таз и Пур. По сезонам сток распределяется следующим образом: зима — 8,4%, весна — 14,6%, лето — 56%, осень — 21% [12] в согласии с гидрографом (заимствованным с сайта <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/> — рис. 2), показывающим ежесуточный среднеклиматический относительный расход Оби. Зимнее питание реки осуществляется в основном за счет грунтовых, болотных вод, бедных кислородом [9]. Поступление этих заморных вод в южную часть губы вынуждает рыбу отходить в более северные участки [11].

Суммарные течения в Обской губе слагаются из квазипостоянных, приливных и ветровых течений.

Квазипостоянные течения направлены с юга на север и образуются благодаря стоку рек. Средняя скорость течений в Южной части Обской губы составляет 20—25 см/с, достигая в период половодья (май, июнь, июль) 30 см/с. На севере, в районе поселка Сабетта и выше, скорость квазипостоянных течений снижается до 10 см/с и менее. Из-за природных

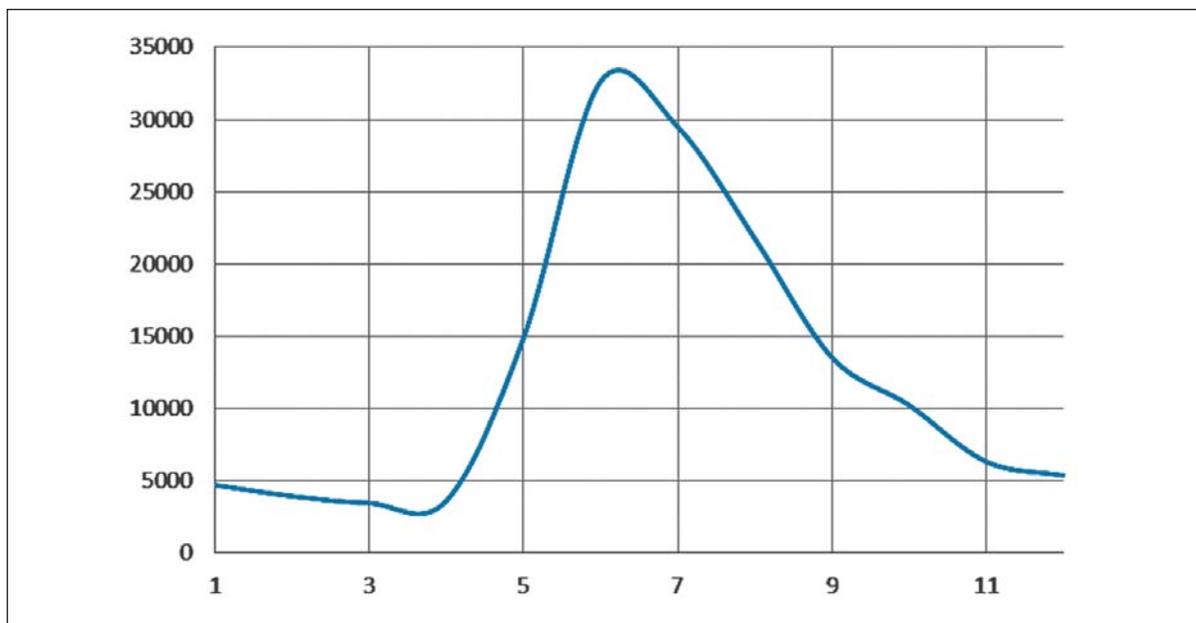


Рис. 2. Среднегодовой гидрограф речного стока Оби, м³/с

особенностей могут возникать так называемые компенсационные течения вдоль побережья, и их направление противоположно основному стоковому течению. В северной части губы придонные течения могут быть направлены на юг, т. е. происходит заток морской воды. Дальность затона зависит от расхода впадающих рек.

Дрейфовые течения в Обской губе ярко выражены, их скорость и направление связаны со скоростью и направлением ветра. С ноября по май преобладают ветры с южной половины горизонта, особенно южные и юго-западные, со средними скоростями 6—8 м/с. В это время года Обская губа покрыта льдом, и влияние ветров на течения пренебрежимо мало. Летом (в июне-августе) преобладают ветры с северной половины горизонта, особенно северные и северо-западные, со средними скоростями 5—7 м/с. В сентябре и октябре преобладают западные ветры. Наиболее волноопасные ситуации в Обской губе возникают при ветрах, дующих вдоль ее оси, соответственно северных и южных.

Приливы в Обской губе имеют главным образом полусуточный характер. Средняя величина изменения уровня под воздействием приливов составляет 20—50 см в зависимости от расстояния от выхода Обской губы в Карское море.

При штиле во время прилива суммарные течения направлены на юг, продолжаются около 4 ч со скоростью до 36 см/с. Во время отлива суммарные течения направлены на север, причем в сизигийный отлив эти течения продолжаются около 6 ч, а в квадратурный — 7 ч. Скорость их составляет соответственно 36—51 и 20—36 см/с.

К особенностям расхода Оби можно отнести сильную изменчивость как в течение года, так

и межгодовую. Согласно наблюдениям, собранным за последние 70 лет (см. материалы Группы анализа водных систем — Water Systems Analysis Group — при Университете Нового Хэмпшира, США, сайт <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>), в наиболее полноводный 1979 г. расход (discharge) Оби достигал 572,12 км³, что более чем вдвое превышает величину расхода 267,69 км³, имевшего место в наименее полноводный 1961 г.

Таким образом, можно говорить о сложном гидрологическом режиме Обской губы, моделирование которого представляет трудную задачу.

Реализация численной модели гидротермодинамики Обской губы и сценарии численных экспериментов

Главная задача настоящей работы — оценка изменений солевого режима в районе проектируемого канала в северной части Обской губы (см. рис. 2), которые могут быть вызваны изменением топографии дна в результате строительства подходного канала. Поскольку натурный эксперимент в данном случае невозможен, остается единственный способ решения этой проблемы — путем экспериментов на чувствительность солевого режима к изменению топографии с помощью численного моделирования.

Для этого используется созданная в Институте вычислительной математики РАН универсальная σ -модель океанической и морской циркуляции [6] INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Она хорошо зарекомендовала себя в рамках участия в международных проектах CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) [25], в решении практических задач воспроизведения циркуляции Черного и Азовского морей

[31] и распространения загрязнений в акватории Большого Сочи [7], а также при расчетах распространения радиоактивного загрязнения от АЭС «Фукусима-1» [5].

В основе INMOM лежит полная система так называемых примитивных уравнений гидротермодинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H - \zeta},$$

где z — обычная вертикальная координата; $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$ — отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности как функция долготы λ , широты φ и времени t ; $H = H(\lambda, \varphi)$ — невозмущенная глубина моря.

Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура T , соленость S , отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности, толщина и сплоченность морского льда. Для расчета плотности используется уравнение состояния, специально предназначенное для численных моделей [24].

Главная особенность INMOM, которая отличает ее от других известных моделей океана, таких как MOM, использующих z -систему координат, а также POM и ROMS в σ -системе координат и др., заключается в том, что при численной реализации в INMOM используется метод расщепления по физическим процессам и пространственным координатам [15]. Метод расщепления дает возможность эффективно реализовывать обладающие малой диссипативностью квазиполунеявные схемы интегрирования по времени, которые позволяют применять в модели в несколько раз большие временные шаги, чем в моделях общей циркуляции океана, основанных на явных схемах с аналогичными пространственным разрешением и коэффициентами вязкости и диффузии.

Для более точного описания процессов динамики океана оператор боковой диффузии второго порядка для тепла и соли представлен в форме, эквивалентной горизонтальной диффузии в обычной z -системе координат [6]. В уравнениях движения для описания боковой вязкости используется оператор четвертого порядка, эффективно подавляющий двухшаговую моду численного шума.

Численная дискретизация уравнений гидротермодинамики модели выполнена на «C»-сетке в классификации Аракавы [22]. При этом адвективные члены аппроксимируются полудивергентными разностными аппроксимациями на «C»-сетке, чтобы выполнялись квадратичные аналоги консервативности, присущие исходным дифференциальным уравнениям. Численная реализация модели основывается на стандартных параллельных алгоритмах расчета MPI-OpenMP.

Модель циркуляции INMOM была адаптирована к акватории Обской губы включая Тазовскую губу. Схематически область моделирования изображена на рис. 1. Она значительно больше, чем интересующая нас область подходного канала (см. рис. 2). Необходимость включения в расчет части акватории Карского моря, а также Тазовской губы и акватории Обской губы ниже ее, обусловлена тем, что при решении поставленной задачи приходится моделировать приток соленых вод в Обскую губу. Основным фактором такого притока являются течения приливных волн, которые согласно данным ФГБУ «ГОИН» (<http://www.oceanography.ru>) распространяются вплоть до устьев Оби и Таза. Следовательно, необходимо как можно дальше отодвинуть «жидкие» границы от расчетной области, чтобы можно было задавать на них физически корректные условия и избежать взаимодействия с ними течений в расчетной области. Таким образом, модельная область охватывает всю Обскую губу (рис. 3), а не только ее северную часть (см. рис. 1), в районе которой планируется строительство канала. Увеличение области

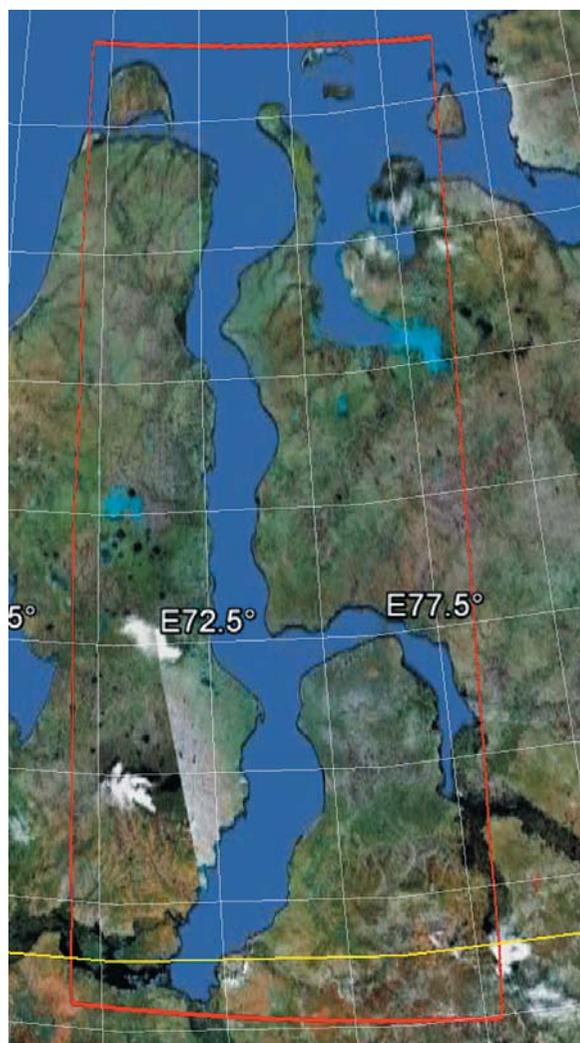


Рис. 3. Область моделирования течений и гидрофизических полей Обской губы

до устьев Оби и Таза позволяет адекватно моделировать взаимодействие приливной волны и распространение пресных вод от рек, втекающих в Обскую губу.

Для более корректного описания Обской губы модель была реализована в повернутой сферической системе координат, чтобы разместить положение подходного канала вдоль одной из осей. Это позволяет лучше описывать его геометрию даже на достаточно грубой сетке, что очень важно для решения поставленной задачи. Кроме того, так достигается цель покрыть область как можно более равномерными шагами по горизонтали для создания оптимального пространственного разрешения, чего трудно добиться в обычной географической системе координат из-за сгущения меридианов при приближении к Северному полюсу вследствие близкого расположения к нему Обской губы и ее значительной протяженности с юга на север.

Переход от географической системы координат к модельной осуществляется симметричным смещением положений полюсов (северного и южного). Смещение проводится таким образом, что исследуемая акватория помещается на экватор в модельной системе координат. Этот поворот позволяет сделать шаги сеточной области близкими к равномерным и равными примерно 500 м по модельным долготе и широте соответственно. В силу небольших глубин Обской губы по сравнению с обычными морскими глубинами число вертикальных уровней было выбрано равным 5. Тем не менее размерность сеточной области, составляющая $1354 \times 1399 \times 5$, довольно значительна даже для современных высокопроизводительных компьютеров.

Для выбранных параметров сеточного разрешения модели параметризация крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии для температуры и солёности осуществлялась с помощью оператора второго порядка с коэффициентом $50 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. В качестве горизонтальной вязкости использовался оператор четвертого порядка с коэффициентом $10^9 \text{ м}^4 \text{ с}^{-1}$. Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии в используемой параметризации Пацановского и Филандера [30] были следующие. Коэффициент вертикальной вязкости изменяется в зависимости от числа Ричардсона от 10^{-4} до $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, а коэффициент диффузии — от $0,5 \cdot 10^{-5}$ до $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ для T и от $0,1 \cdot 10^{-5}$ до $0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ для S . В случае неустойчивой стратификации для параметризации конвективного перемешивания коэффициент вертикальной диффузии задавался равным $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Чтобы избежать возможных для σ -модели ситуаций «выклинивания» вертикальных профилей T , S и скорости в приповерхностном 2,5-метровом слое океана для более интенсивного перемешивания (которое можно рассматривать как параметризацию коэффициентов диффузии и вязкости) задавались равными тому же значению $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

Для расчета характеристик морского льда используется модель формирования ледового покрова с упруго-вязко-пластичной реологией [20; 23; 27].

Гидродинамическая модель циркуляции воды и льда приводится в движение атмосферным воздействием, речным стоком и приливом. На границе Обской губы с Карским морем для температуры и солёности задаются граничные условия в виде так называемых ватных стенок: в граничных точках предписывается среднеклиматический годовой ход распределения температуры и солёности согласно комбинированным данным атласов Левитуса [29; 21] и Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) (<http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php?im=201>).

Для задания приливной волны на границе с Карским морем предписывается приливной уровень, рассчитываемый по модели ТРХО. Здесь используется версия ТРХО 7.2 — модель ассимиляции данных возвышения свободной поверхности океана, полученных со спутников TOPEX и «Poseidon» (Т/Р), в глобальную модель баротропного прилива, разработанную в [26].

Начальные условия. В качестве начальных условий задавались состояние покоя для скорости и климатические поля для температуры и солёности. При этом климатология для этих данных составлялась путем комбинаций открытых данных электронных климатических атласов Левитуса [29; 21] для Мирового океана и ААНИИ для Карского моря (<http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php?im=201>). Необходимость такого комбинирования обусловлена тем, что в среднемесячных данных Левитуса более подробно представлен климатический годовой ход по сравнению с сезонными данными ААНИИ, но последние более качественно описывают пространственные распределения температуры и солёности в Обской губе.

Атмосферное воздействие. Расчет атмосферного воздействия осуществлялся по хорошо опробованным балк-формулам [2] по приводным синоптическим характеристикам атмосферы из базы данных CORE (Data sets for Common Ocean-ice Reference Experiments) для периода с 1948 по 2007 гг. [28].

Атмосферные характеристики CORE включают в себя температуру воздуха, влажность и скорость ветра на высоте 10 м и атмосферное давление на уровне моря (временной интервал 6 ч); длинноволновую и коротковолновую радиацию (временной интервал 24 ч); среднемесячные атмосферные осадки. Пространственное разрешение полей названных атмосферных характеристик в CORE составляет по долготе $1,8750^\circ$. По широте разрешение неравномерное: у экватора оно составляет $1,9048^\circ$ и нарастает к полюсам до $1,8888^\circ$. Поскольку данные CORE заданы в обычной географической системе координат на сетке, они переводились на модельную область внутри расчетного блока модели путем пространственной интерполяции, основанной на

решении уравнения Лапласа на сфере и позволяющей избежать ложных экстремумов [3].

Речной сток. Учитывался речной сток от следующих основных рек, впадающих в Обскую губу: Оби, Надыма, Таза и Пура. Данные о стоках рек были взяты с сайта <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/>. Для всех рек был принят одинаковый гидрограф внутригодового изменения речного стока, показанный на рис. 3. Сток рек в модели учитывался путем задания изменения уровня в устьях рек, который, в свою очередь, пересчитывался через расходы соответствующих рек. Соленость в устьях рек задавалась нулевой.

Условия на жидкой границе с Карским морем. Здесь задавался приливной ход изменений уровня моря согласно приливной модели TPXO (TOPEX/Poseidon Global Tidal Model), основанной на данных спутниковой альтиметрии. Для учета теплового и солевого обмена для температуры и солености использовались условия релаксации к климатическим значениям (см. выше) с характерным временным масштабом около 5 сут.

Другие граничные условия. На дне бассейна вертикальная составляющая скорости течений и нормальные к поверхности дна потоки тепла полагались равными нулю. Придонное напряжение трения параметризовалось как квадратичная функция горизонтальной скорости на ближайшем к дну модельном уровне с безразмерным коэффициентом, равным $2,5 \cdot 10^{-3}$. На твердых боковых границах (берегах) бассейна задавались условие скольжения для горизонтальной скорости течений и условие отсутствия нормального к границе потока тепла.

Сценарии экспериментов. Для изучения влияния проектируемого подходного канала на изменение соленостного режима в северной части Обской губы были разработаны три модельных сценария. Они дифференцированы в зависимости от речного стока (минимального, среднеклиматического и максимального) при одинаковом атмосферном воздействии. В каждом сценарии проводятся два эксперимента с различной донной топографией: естественной и при наличии подходного канала. Таким образом, проведено шесть численных экспериментов, результаты которых приводятся ниже. Атмосферное воздействие бралось для так называемого нормального года из данных CORE, которые составлялись из среднемесячных климатических данных годового хода и средне-статистических синоптических аномалий. Длительность каждого эксперимента составляет год и месяц. Эксперименты начинались с июля и продолжались по август следующего года. За первый месяц происходил разгон модели, поэтому из анализа он исключался. Для анализа июль брался из конца расчетов.

Воспроизведение гидрологического режима Обской губы

Среди климатических характеристик для Обской губы наиболее репрезентативными, на наш взгляд, являются данные ААНИИ (<http://www.aari.ru/>

[projects/ECIMO/index.php?im=201](http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php?im=201)). Однако они доступны только для зимнего и летнего сезонов. Поэтому сравнение рассчитанных и наблюдаемых полей температуры и солености проводилось именно для них. Поскольку главный интерес настоящей статьи заключается в воспроизведении соленостного режима, приведем здесь только сравнительные карты полей солености.

На рис. 4 показаны наблюдаемые и рассчитанные приповерхностные распределения солености на глубине 5 м для летнего сезона при среднеклиматическом речном стоке. Из этих данных следует, что модель INMOM и способ ее расчета адекватно воспроизводят соленостный режим в Обской губе и вполне пригодны для решения поставленной задачи.

Поскольку выше показано, что наши расчеты вполне адекватно отражают климатическое распределение температуры и солености в Обской губе, можно надеяться, что циркуляция в Обской губе воспроизводится также с хорошим качеством. Поэтому рассмотрим особенности приповерхностного и придонного циркуляционного режима в районе подходного канала.

На рис. 5 показаны вертикальные сечения за апрель и июнь среднеклиматических скоростей течений в русле Обской губы на поперечном разрезе, проходящем приблизительно через середину подходного канала. Эти месяцы характеризуют относительно большой (июнь) и малый (апрель) стоки Оби согласно гидрографу речного стока, показанному на рис. 2. По этим рисункам можно судить о сложном характере вертикального и горизонтального распределения скорости течений в Обской губе. В апреле, в период малого стока, стратификация скорости вызывается в основном соленостной стратификацией: распресненные, более легкие воды текут на север в Карское море в поверхностном слое, а более плотные морские воды распространяются на юг в приглубых слоях. При этом величины придонных скоростей вполне сопоставимы с поверхностными. Но поскольку площади сечений для поверхностной скорости больше, то в целом осуществляется отток вод Обской губы в Карское море в соответствии с речными расходами.

В периоды же максимального стока, как и следовало ожидать, существенно преобладают скорости, направленные на север, причем характер стратификации существенно меняется по сравнению с зимним. Следует отметить картину сечения вдоль руслового течения для июня. Здесь течение имеет ярко выраженный стрежень с центром на глубине 8 м. Приповерхностные воды имеют меньшую скорость течения на север, а вдольбереговые течения вообще направлены на юг. Такой характер стратификации вызван северными ветрами, которые, как уже указывалось, характерны для летних месяцев, «сдувающих» поверхностные воды на юг.

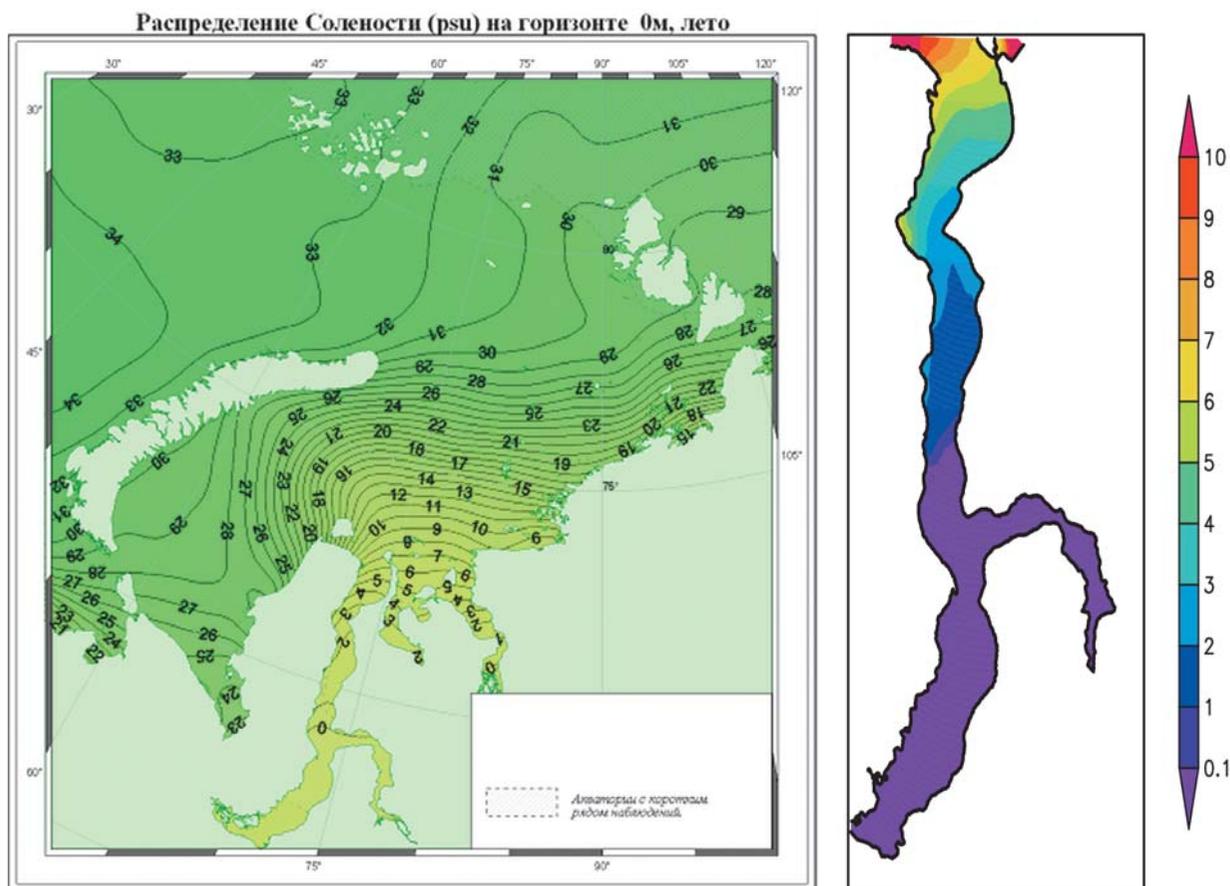


Рис. 4. Слева: соленость (PSU) Карского моря и Обской губы в летний сезон на поверхности по данным климатического атласа ААНИИ (http://www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Summer/Fields/SAL/S_0000_MEA1.htm). Справа: соленость (PSU) Обской губы в летний сезон на поверхности по результатам расчета

Воспроизведение соленостного режима в Обской губе для естественного русла и при наличии подходного канала

Наличие подходного канала задается в модели путем изменения топографии дна в соответствии с его характеристиками. Следует отметить, что пространственное разрешение модели (примерно 500 м) позволяет сохранить только крупномасштабные его особенности. Поэтому, видимо, в проведенных расчетах его влияние несколько завышается, что, однако, даже хорошо, так как завышается и его возможное воздействие на гидрологический режим в расчетной области.

Для исследования распространения соленых вод Карского моря в условиях естественной топографии Обской губы и при наличии подходного канала необходимо учитывать изменчивость величины речного стока. При различных режимах речного стока проникновение распресненных вод от рек в разные года меняется. Поэтому для двух типов топографии Обской губы были проведены эксперименты для максимального, среднеклиматического и минимального стоков Оби, Надыма, Пура и Таза, т. е. всего шесть численных расчетов годового хода гидрологических

характеристик Обской губы. При этом в каждом эксперименте годовой ход стока рек задавался согласно гидрографу стока Оби, представленному на рис. 2, а атмосферное воздействие задавалось одинаковым, соответствующим среднему климатическому годовому, но с учетом атмосферной синоптики. Таким образом, исследовалось влияние речного стока на гидрологический режим в исследуемой акватории для естественного русла Обской губы и при наличии подходного канала.

Влияние подходного канала на изменение соленостного режима в Обской губе исследовалось путем сравнительного анализа результатов этих экспериментов, который показал, что наиболее сильно подходный канал влияет на распределение солености в придонном слое при минимальном стоке Оби.

Приведем картины для этого сценария расчетов. Минимальный среднегодовой сток (см. выше) брался согласно имеющимся данным для Оби, Надыма, Пура и Таза. Согласно гидрографу при расчетах задавался среднесуточный расход каждой реки. На рис. 6 вверху показаны среднегодовые рассчитанные распределения солености в придонном слое без подходного канала и с таковым. Влияние наличия

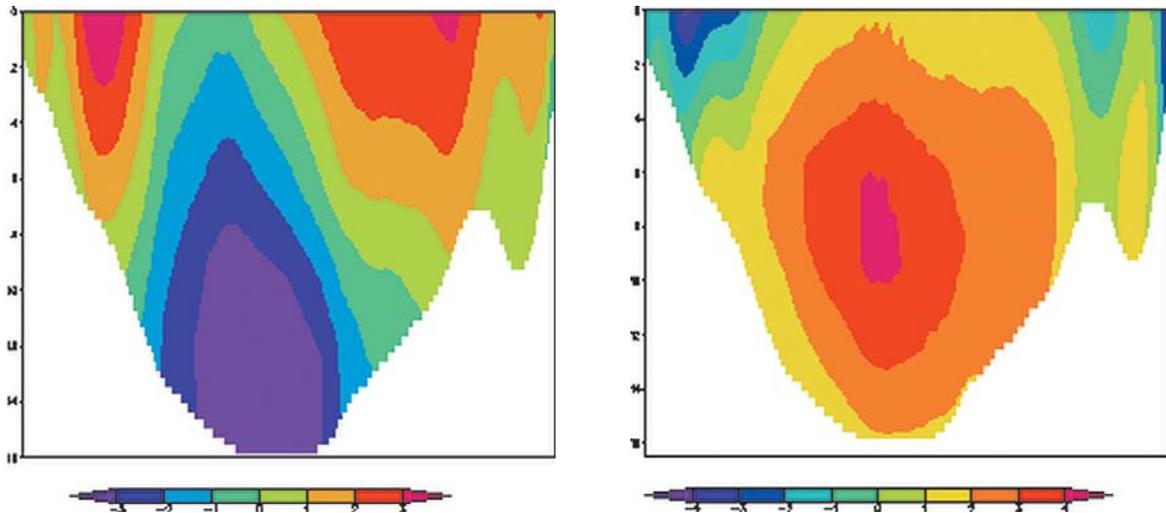


Рис. 5. Поперечное сечение через подходный канал меридиональной составляющей скорости (см/с), осредненной за апрель (слева) и июнь (справа). Положительные значения скорости соответствуют направлению на север, отрицательные – на юг

подходного канала на распределение солёности на поверхности исследуемой акватории показано на рис. 6 внизу в виде абсолютной и относительной разницы среднегодового распределения солёности. При этом относительная разница рассчитывалась по отношению к ситуации без проектируемого подходного канала. Из рис. 6 видно, что в абсолютных величинах распределений солёности разница между ситуациями с каналом и без него практически незаметна. Это связано с тем, что абсолютные разности в солёности при наличии канала и без него составляют всего 0,1—0,45 PSU, что, в свою очередь, составляет не более 4% (см. рис. 6в и 6г).

Пространственное распределение абсолютных и относительных отклонений, показывающих влияние подходного канала, на поверхности и на дне попарно по форме довольно хорошо совпадают. Однако придонные значения непосредственно в подходном канале, как и следовало ожидать, выше. Отмечается основная особенность: слева от канала разность положительна, а справа отрицательна. Это легко объясняется тем, что наличие канала усилило заток более солёных карских вод, который согласно геострофическим соотношениям прижимается к левому берегу

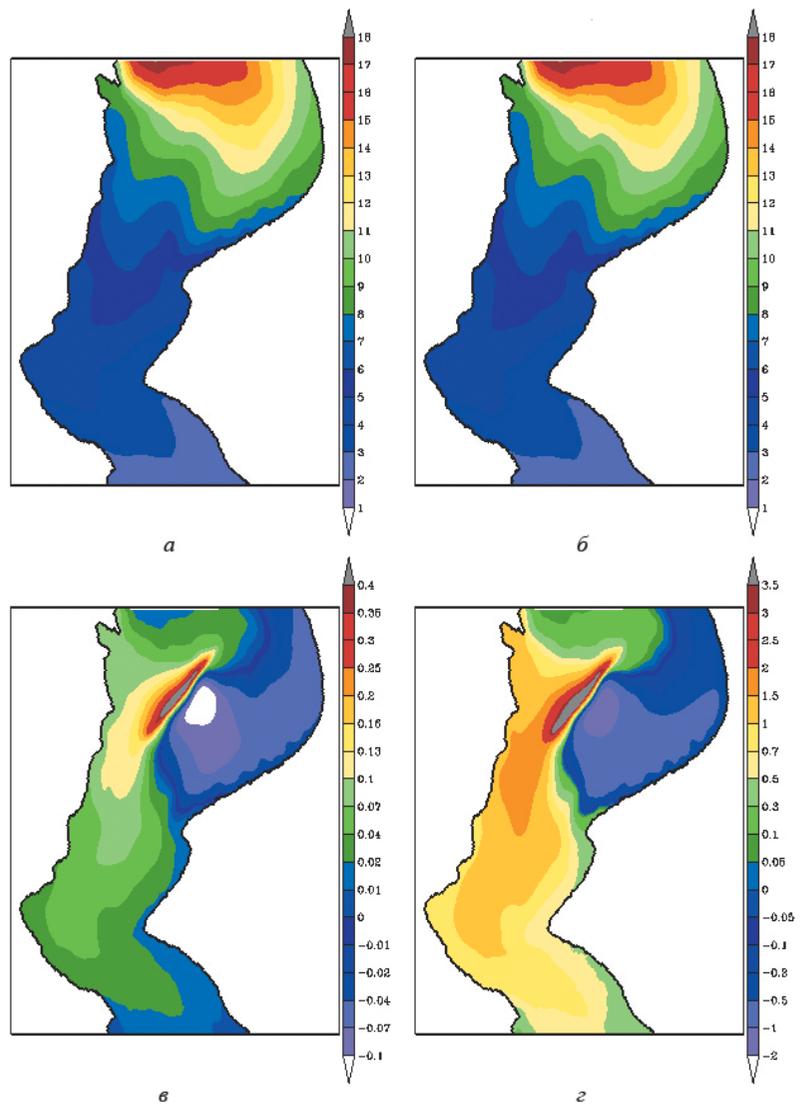


Рис. 6. Придонные среднегодовые поля солёности (PSU) в северной части Обской губы при расчетах без проектируемого подходного канала (а) и с ним (б). Абсолютная разница (PSU) (в) и относительная разница (%) (г) солёностей в расчетах с проектируемым подходным каналом и без него

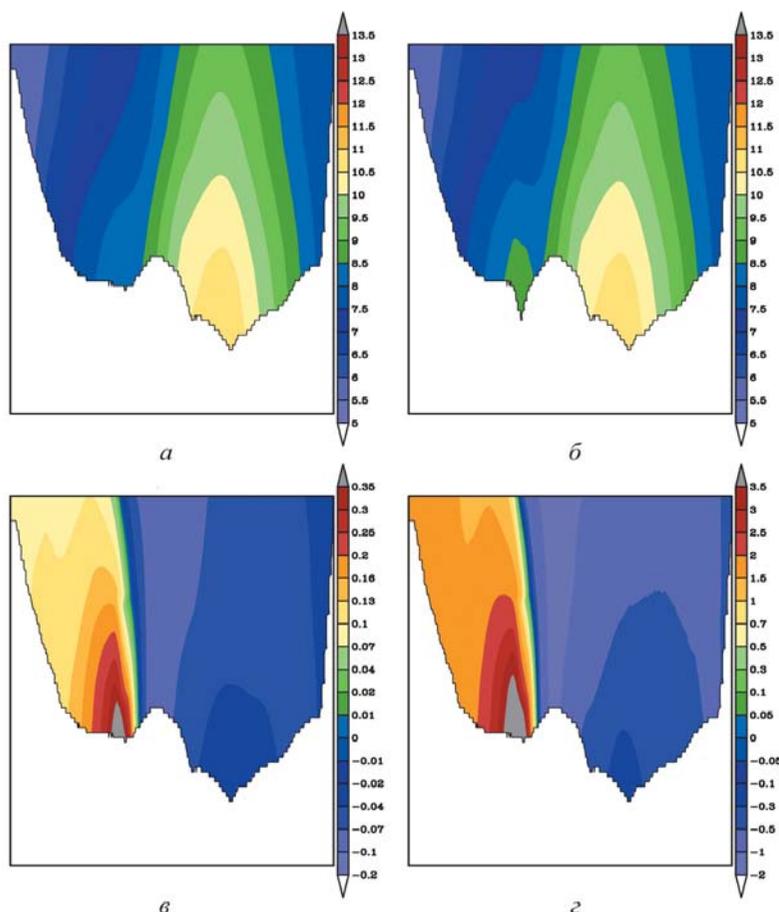


Рис. 7. Характеристики соленостного режима Обской губы на сечении через подходной канал. Среднегодовая соленость (PSU) при расчетах без подходного канала (а) и с ним (б). Абсолютная разница (PSU) (в) и относительная разница (%) (г) соленостей в расчетах с подходным каналом и без него

Обской губы, так как направлен на юг. Естественно, чтобы компенсировать излишний приток вод Карского моря, распресненные обские воды направляются на север и, следовательно, должны прижиматься к правому берегу Обской губы.

Из рис. 6в и 6г видно также, что пространственные распределения абсолютных и относительных отклонений не совпадают между собой. Основное отличие проявляется в том, что относительная разница занимает более обширную область, распространяющуюся на юг Обской губы. Это легко объясняется тем, что к югу абсолютная соленость вод Обской губы падает, что и приводит к росту относительных отклонений, так как при ее вычислении делится на более малые значения солености.

На рис. 7 на вертикальном сечении, проходящем через середину подходного канала, показаны среднегодовые поля солености при наличии подходного канала и при естественной топографии, а также абсолютная и относительная разница соленостей в расчетах с подходным каналом и без него для минимального годового стока Оби. Схема представления результатов на этих рисунках такая же, как и на рис. 6. Для всех этих сечений солености также можно констатировать, что в абсолютных величинах влияние канала трудно заметить. В отклонениях проявляется общая картина влияния канала, заключающаяся в том, что повышение солености наблюдается от канала к левому берегу, а понижение — к правому. Выше уже было дано объяснение этому явлению. Еще одна общая картина отклонений солености, вызванных наличием канала, проявляется в том, что они уменьшаются от дна к поверхности. Это также легко объясняется тем, что более соленые и, следовательно, более плотные воды Карского моря распространяются в Обскую губу в придонных слоях.

Анализ вертикальных сечений севернее и южнее подходного канала (рис. 8—9) показывают также, что повышение солености наблюдается к правому берегу, а понижение — к левому. В целом изменения солености существенно ниже и не превышают 0,1 PSU севернее и южнее канала. Таким образом, действие канала наблюдается только в локальной области. При удалении от подходного канала изменения в соленостном режиме незначительны.

Картины отклонений, показанные на рис. 6—9, демонстрируют, что наибольшие отклонения солености, как и следовало ожидать, находятся в канале и в непосредственной близости от него.

На рис. 10 представлено поле среднегодовой, осредненной по глубине разницы в солености для расчетов при наличии подходного канала и без него при среднеклиматическом стоке рек. Расчеты также подтверждают, что максимальные изменения

Рис. 8. Характеристики солёностного режима Обской губы на сечении севернее подходного канала. Среднегодовая солёность (PSU) при расчётах без подходного канала (а) и с его учётом (б). Абсолютная разница (PSU) (в) и относительная разница (%) (г) солёностей в расчётах с подходным каналом и без него

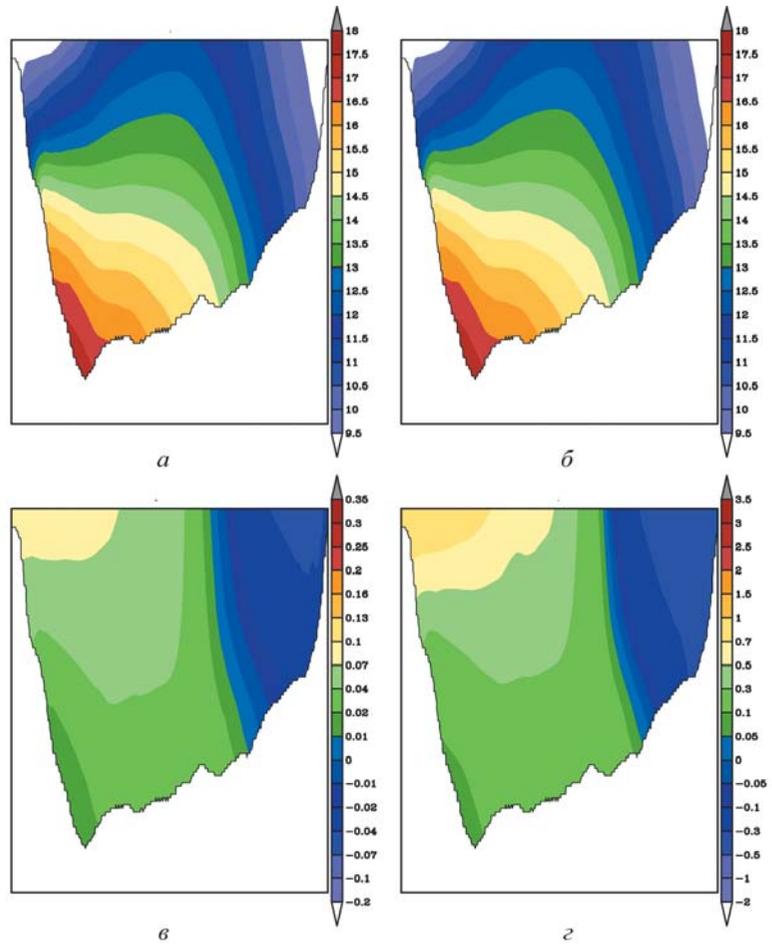
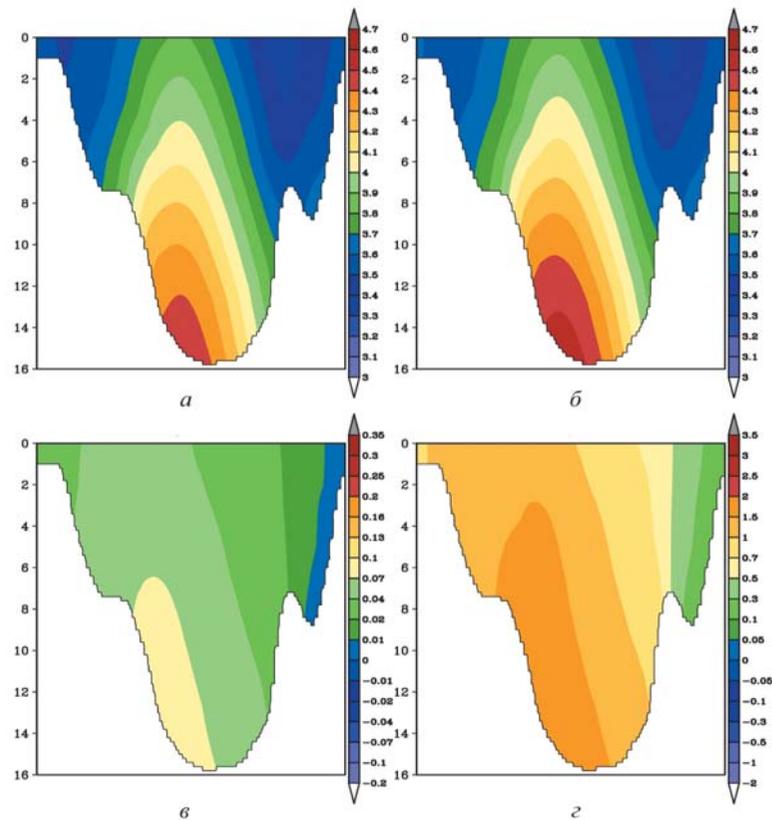


Рис. 9. Характеристики солёностного режима Обской губы на сечении южнее подходного канала. Среднегодовая солёность (PSU) при расчётах без подходного канала (а) и с его учётом (б). Абсолютная разница (PSU) (в) и относительная разница (%) (г) солёностей в расчётах с подходным каналом и без него



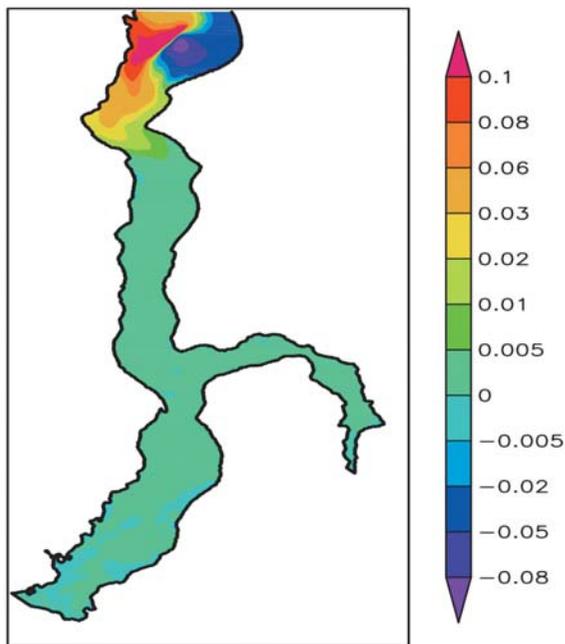


Рис. 10. Среднегодовая осредненная по глубине разница в солености (PSU) для расчетов при наличии подходного канала и без него при среднеклиматическом стоке рек

в солености наблюдаются в непосредственной близости к каналу и составляют до 0,3 PSU. При удалении от канала наблюдается резкое уменьшение влияния канала на соленостный режим акватории Обской губы. В районе поселка Сабетта изменения солености не превышают 0,005 PSU. В центральной и южной частях Обской губы изменения не превышают 0,001—0,002 PSU.

Заключение

Расчеты показали, что изменения солености как в абсолютных, так и в относительных величинах происходят в основном в области, близлежащей к каналу. Максимальные изменения происходят в канале: 0,45—0,5 PSU в абсолютных значениях и 4,5—5% в относительных. Относительные изменения высчитывались по отношению к расчетам с естественной топографией дна Обской губы. Согласно наблюдениям межгодовая изменчивость солености [14] в области подходного канала может достигать 10 PSU.

Таким образом, можно сделать вывод, что влияние канала носит преимущественно локальный характер и не приведет к увеличению зоны распространения соленых вод. При удалении от канала изменения в солености существенно меньше. В районе поселка Сабетта изменения в солености не превышают 0,005 PSU, в центральной и южной частях не превышают 0,001—0,002 PSU. Как межгодовая, так и внутригодовая естественная изменчивость соленостного режима на акватории Обской губы существенно выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества в рамках научного проекта РФФИ-РГО № 13-05-41214-РГО. Авторы выражают благодарность О. В. Кузнецовой за помощь в подготовке публикации.

Литература

1. Бурмакин Е. В. Рыбы Обской губы // Тр. Ин-та поляр. экспедиции, животноводства и промыслового хозяйства. Сер. Промысловое хозяйство. — 1940. — Вып. 10. — С. 490—570.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. — В 2 т. — Т. 2. — М.: Мир, 1986. — 415 с.
3. Гусев А. В. Численная модель гидродинамики океана в криволинейных координатах для воспроизведения циркуляции мирового океана и его отдельных акваторий: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ин-т вычисл. математики РАН. — М., 2009. — 143 с.
4. Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948—2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 3—15.
5. Дианский Н. А., Гусев А. В., Фомин В. В. Особенности распространения загрязнений в северо-западной части Тихого океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 247—266.
6. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. — М.: Физматлит, 2013. — 272 с.
7. Дианский Н. А., Фомин В. В., Жохова Н. В., Коршенко А. Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи на основе численного моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 664—675.
8. Дианский Н. А., Фомин В. В., Кабатченко И. М., Грузинов В. М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1 (13). — С. 57—73.
9. Залогин Б. С., Родионов Н. А. Устьевые области рек СССР. — М.: Мысль, 1963. — С. 312.
10. Иванов В. В., Осипова И. В. Сток обских вод в море и его многолетняя изменчивость // Тр. Арктич. и Антарктич. науч.-исслед. инта. — 1972. — Т. 297. — С. 86—91.
11. Кузнецов В. З., Ефремкин И. М., Аржанова Н. В. и др. Современное состояние экосистемы Обской губы и ее рыбохозяйственное значение // Вопр. промысловой океанологии. — 2008. — Вып. 5, № 2. — С. 129—153.
12. Михайлов Н. И., Гвоздецкий Н. А. Физическая география СССР. — М.: Изд-во МГУ, 1978. — 455 с.
13. Лапин С. А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. — 2011. — Т. 51, № 6. — С. 984—993.

14. Лапин С. А. Пространственно-временная изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик Обской губы как основа оценки ее биопродуктивности: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. — М., 2012. — 25 с.
15. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. — СПб.: Лань, 2009. — 608 с.
16. Матишов Г. Г., Денисов В. В., Дженюк С. Л. Экологический мониторинг прибрежной зоны Баренцева и Карского морей // Изв. АН. Сер. геогр. — 1999. — № 3. — С. 69—76.
17. Москаленко Б. К. Биологические основы эксплуатации и воспроизводства сиговых рыб Обского бассейна. — Тюмень: Тюмен. кн. изд-во, 1958. — 251 с. — (Тр. Обь-Тазовского отделения ВНИОРХ. Новая серия; т. 1).
18. Разливы нефти: Проблемы, связанные с ликвидацией последствий разливов нефти в арктических морях: Отчет. — Изд. 2-е, доп. / Всемир. фонд дикой природы (WWF). — М., 2011. — 32 с.
19. Юданов И. Г. Обская губа и ее рыбохозяйственное значение (по материалам Ямальской экспедиции 1932 г.) // Работы Обь-Тазов. науч. рыбохоз. станции ВНИРО. — 1935. — Т. 1, вып. 4. — С. 103.
20. Яковлев Н. Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948—2002 гг. — Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. ФАО. — 2009. — Т. 45, № 3, — С. 1—16.
21. Antonov J. I., Seidov D., Boyer T. P. et al. World Ocean Atlas 2009. — Vol. 2: Salinity / S. Levitus, ed.; NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office. — Washington, D.C., 2010. — 184 p.
22. Arakawa A., Lamb V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model // Methods in computational Physics. — 1977. — Vol. 17. — P. 173—265.
23. Briegleb B. P., Bitz C. M., Hunke E. C. et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, version three: Technical Note NCAR/TN-463+STR / National Center for Atmospheric Research. — Boulder, Colorado, 2004.
24. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. — 1999. — Vol. 104, № C1. — P. 1537—1540.
25. Danabasoglu G., Yeager S. G., Bailey D. et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). — Pt. 1: Mean states // Ocean Modelling. — 2014. — 73. — P. 76—107.
26. Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Oceanic Technol. — 2002. — 19 (2). — P. 183—204.
27. Hunke E. C., Dukowicz J. K. An elastic-viscoplastic model for sea ice dynamics // J. Phys. Oceanogr. — 1997. — Vol. 27. — P. 1849—1867.
28. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // Clim Dyn. — 2009. — Vol. 33. — P. 341—364.
29. Locarnini R. A., Mishonov A. V., Antonov J. I. et al. World Ocean Atlas 2009. — Vol. 1: Temperature / S. Levitus, ed.; NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office. — Washington, D.C., 2010. — 184 p.
30. Pacanovsky R. C., Philander G. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. — 1981. — Vol. 11. — P. 1442—1451.
31. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. — 27 (1). — P. 95—111.