

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 84-99.
Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 84-99.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.555.4
doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМА ОБСКОЙ ГУБЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА DELFT3D: СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Александр Николаевич Семчуков¹, Владимир Викторович Кириллов²

^{1, 2}*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

¹*ss16011973@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2876-5713>*

²*heller53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9626-7153>*

Аннотация. С помощью численной модели на основе программного комплекса Delft3D выполнен расчет термохалинного и ледового режимов Обской губы и прилегающего шельфового района Карского моря за 2010 г. Результаты расчета сопоставлены с данными экспедиционных исследований, спутниковыми и литературными данными. На основе анализа результатов определены основные направления совершенствования модели.
Ключевые слова: Обская губа, математическое моделирование, температура, соленость, лед.

Цитирование: Семчуков А.Н., Кириллов В.В. Расчет термохалинного режима Обской губы // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 84–99. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006.

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF THERMOHALINE CONDITIONS OF THE GULF OF OB BY THE DELFT3D SOFTWARE PACKAGE: COMPARISON OF SIMULATION RESULTS WITH FIELD DATA

Aleksandr N. Semchukov¹, Vladimir V. Kirillov²

^{1,2}Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

¹ss16011973@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2876-5713>

²heller53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9626-7153>

Abstract. Using a numerical model based on the Delft3D software package, the thermohaline and ice conditions of Gulf of Ob and the adjacent shelf area of the Kara Sea were simulated for 2010. The simulation results were compared with expeditionary research data, satellite and literary data. Based on the analysis of the results, the main directions for improving the model were determined.

Keywords: Gulf of Ob, numerical simulation, temperature, salinity, ice.

Citation: Semchukov A.N., Kirillov V.V. Simulation of thermohaline conditions of the Gulf of Ob // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4 (121). P. 84–99. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006.

Введение

Температура и соленость являются важными факторами, влияющими на жизнедеятельность водной экосистемы, качество воды и рыбопродуктивность водоема. В эстуариях не только температура, но и соленость подвержены большой пространственной и временной изменчивости и в значительной степени определяется дальностью проникновения морских вод. В последнее время район Обской губы интенсивно осваивается в хозяйственном отношении. Поэтому, в связи с малым развитием сети гидрометеорологических наблюдений и необходимостью прогноза изменения термохалинного режима из-за антропогенного воздействия и изменения климата большое значение приобретает их математическое моделирование. Расчет изменения солености и температуры воды необходимо вести одновременно с расчетом течений и ледового режима.

И то, и другое имеет самостоятельное значение, так как определяет условия навигации.

Данная статья посвящена апробации трехмерной математической модели течений, термохалинного и ледового режимов Обской губы и прилегающего шельфового района Карского моря на основе программного комплекса Delft3D. Результаты расчетов температуры и солёности воды в годовом цикле были сопоставлены с экспедиционными данными, а результаты расчета толщины льда – со спутниковыми и литературными данными.

Математическая модель и подготовка входных данных

В основе программного комплекса Delft3D лежит классическая трехмерная модель течений и термохалинного режима относительно неглубокого водоема, т.е. уравнения Рейнольдса в гидростатическом приближении и приближении Буссинеска, дополненные моделями турбулентного обмена, уравнениями переноса примеси и тепла, уравнением состояния и соответствующими граничными условиями [1]. Программный комплекс позволяет учитывать осушение и затопление дна (ячеек расчетной сетки) при изменении уровня воды.

В расчетах использовался вариант программного комплекса, дополненный модулем, описывающим изменение толщины снежного и ледового покрова [2]. Однако ледотермический блок, описывающий процессы нарастания и таяния льда, а также таяния снега на нем, был полностью переработан. Также как и в оригинале, предполагается квазистационарное распределение температуры по толщине снежно-ледового покрова, что вызывает необходимость нахождения равновесной температуры его верхней поверхности исходя из непрерывности теплового потока на ней. Однако в оригинале при решении соответствующего уравнения температура считалась неизвестной величиной только в радиационном компоненте теплового потока от снежно-ледового покрова в атмосферу, а во всех других компонентах использовалось ее значение на предыдущем временном шаге. Предварительные расчеты показали, что это приводит к нефизическому изменению толщины льда при резком изменении погоды. Поэтому в переработанном блоке, согласно методике [3, 4], температура считается неизвестной во всех компонентах теплового потока. Ледодинамический блок, описывающий механическую трансформацию снежно-ледового покрова, в расчете не использовался, но в отличие от подобной работы [5] в ледотермическом блоке учитывалось наличие снега на льду.

Ледотермический блок был откалиброван для участка Тазовской губы, расположенного около устья р. Таз и Пур (пос. Находка) [6].

Расчет велся в т.н. σ -координатах, когда во всех точках водоем разби-

вается на одинаковое (в данном случае 20) число слоев одинаковой относительной толщины. Вертикальный турбулентный обмен рассчитывался с помощью алгебраической модели, а горизонтальный обмен описывался с использованием постоянных коэффициентов турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности.

Расчетная область включает в себя Обскую, Тазовскую и Гыданскую губы, Енисейский залив, а также мелководную шельфовую часть Карского моря, ограниченную меридианами 68.5° в.д., 81.5° в.д. и параллелями 72.5° с.ш., 74.5° с.ш. Для этой области построена равномерная сферическая конечно-разностная сетка (до 129 узлов по долготе и до 210 – по широте соответственно, что соответствует размеру ячейки порядка 4 км). Расчет велся с 1 июля 2009 г. по 31 декабря 2010 г.

Подготовка входных данных была подробно описана в [6]. В отличие [5] в числе граничных в расчетах учитывалось влияние не только р. Оби, Таза и Пура, но и других притоков расчетной области: р. Енисея, Надыма, Мессояхи, Гыды и Юрибея. При этом задавались не климатические значения расхода и температуры воды этих рек, а их значения конкретно для расчетного периода, либо непосредственно полученные из гидрологических ежегодников [7–10], либо откорректированные или оцененные по косвенным данным.

На морской границе задавался постоянный уровень воды и климатическое пространственно-временное распределение температуры и солености для нескольких уровней глубины [11]. Аналогично задавалось и начальное состояние расчетной области.

Для определения взаимодействия с атмосферой использовались данные 19 береговых и островных метеостанций [12], которые интерполировались методом триангуляции.

Результаты расчета температуры воды и солености

Расчетные величины температуры воды и солености были сопоставлены с данными двух комплексных экспедиций, выполненных ФГУП «ВНИРО» и ИО РАН летом и осенью 2010 г. [13]. Район экспедиций включал в себя среднюю и северную части Обской губы от створа м. Каменный – м. Парусный до широты м. Дровяной и не включал Тазовскую губу. Летняя экспедиция имела место вскоре после очищения губы ото льда в период высоких вод с 29 июля по 17 августа, а осенняя – перед ледоставом, в период низких вод с 18 сентября по 7 октября. Всего было задействовано 120 комплексных станций. Даты и время конкретных измерений в статье [13] не приведены, но, судя по номерам створов, можно предположить, что летом измерения проводились последовательно с юга на север, а осенью наоборот.

Летняя экспедиция

Согласно [13], в целом во время летней экспедиции Обские воды, имевшие на выходе в губу температуру 14–15 °С, к м. Каменному охлаждались до 11 °С, а после слияния с Тазовскими водами быстро охлаждались к границе «речной» части (71° 20' с.ш. или примерно широта м. Хонарасаля) до 3–4 °С.

В расчетах для этого периода задавалась температура вод р. Оби на входе в Обскую губу в пределах 12.1–16.9 °С. Возможно, она была несколько завышена, так как за неимением других достоверных данных использовались значения температуры для гидрологического поста Салехард [7, 8] (для расположенного ниже по течению поста Аксарка указывалась еще более высокая температура). По этой же причине расчетная температура в Обской губе тоже может быть несколько завышена.

Днем 29 июля, как показано на рис. 1, расчетная поверхностная температура у м. Каменный составляла от 10.5 до 13 °С (выше – посередине, меньше – у берегов), а у м. Хонарасаля – от 3 до 5 °С (выше – у берегов,

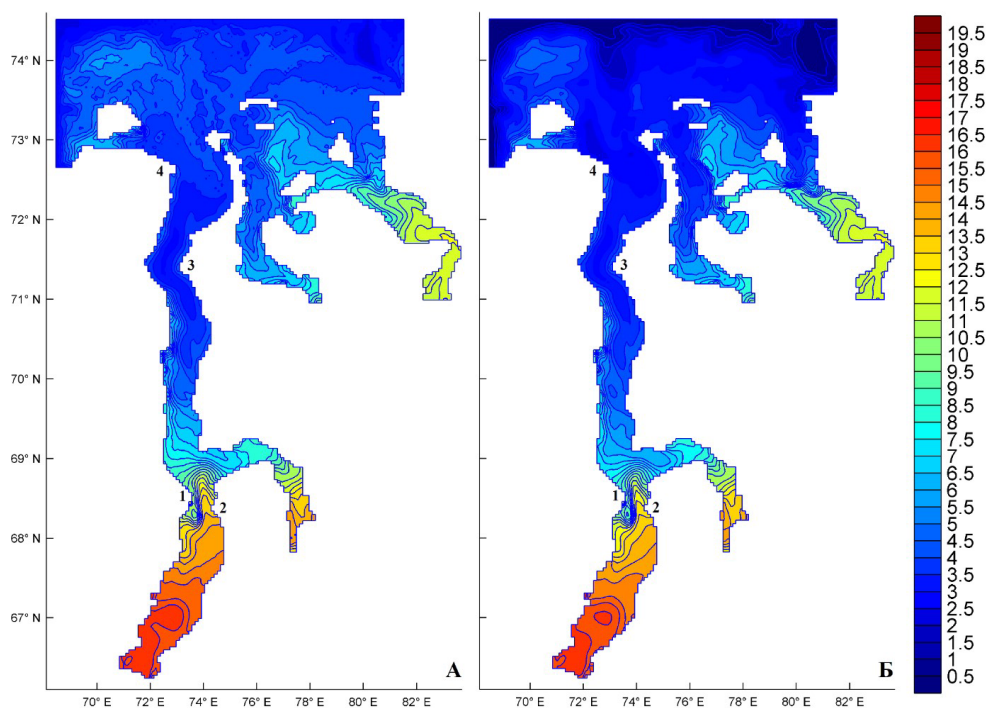


Рис. 1. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) температура воды в полдень 29 июля, °С

Примечание: 1 – м. Каменный, 2 – м. Парусный, 3 – м. Хонарасаля, 4 – м. Дровяной

меньше – посередине). К 17 августа фронт теплой воды в районе устья Тазовской губы незначительно продвигается на север, и поверхностная температура у м. Хонарасаля повышается до 5–6 °С за счет прогрева и оттеснения холодных вод к северу.

Описанный в [13] отжим Обских вод более холодными водами Тазовской губы к левому берегу почти не наблюдается. Возможно, это связано с недооценкой стока впадающих в Тазовскую губу рек (Таз, Пур, Мессо-яха). Для р. Пур расходы были известны только для гидрологического поста Уренгой, находящегося на значительном удалении от устья, а для других рек – неизвестны совсем. Поэтому расходы этих рек у устья пришлось оценивать косвенным образом. Впрочем, на приведенных в [13] рисунках этот отжим слабо выражен.

Аналогично [13], в период летней экспедиции результаты расчетов показывают в «речной» части Обской губы выраженное струйное течение с высоким вертикальным перемешиванием (см. рис. 1) и ограниченным поперечным водообменом. Также как и в [13] в средней части губы вдоль западного, более пологого берега температура воды существенно выше, чем у восточного, где проходит большая часть Обского стока. Обратная картина наблюдается в южной части, которая не была охвачена экспедицией: температура в струе теплых Обских вод выше, чем у берегов.

Термическая картина в «морской» части губы целиком определяется нюансами контакта соленых и пресных вод [13]. Так же, как и в [13], по расчетам соленые воды в период летней экспедиции вторгаются в Обскую губу примерно до широты 72° с.ш. (см. рис. 2). Соленые воды следуют по донному желобу в направлении с северо-запада на юго-восток, то есть, можно, как и в [13], сказать, что «заток соленых вод вдоль восточного берега заметно активнее, что отмечается на всем протяжении зоны контакта соленых и пресных вод».

Согласно [13], на северо-западе губы, около мыса Дровяной, на поверхности наблюдается небольшая зона повышенной минерализации (до 18 ‰), а в остальном соленость над галоклином составляет порядка 1.5 ‰. В расчетах же за счет избыточного вертикального перемешивания соленость опресненного слоя выше (до 9 ‰, в среднем порядка 4 ‰), но в придонном слое соленый фронт продвигается меньше (например, изогалина 10 ‰ доходит на юге до 72° с.ш. – 72°15′ с.ш. против 72°30′ с.ш. в расчетах). Описанная в [13] повышенная соленость в узкой прибрежной полосе так же заметна (у восточного берега), но этот эффект не так выражен. Он наблюдается главным образом в начале описываемого периода, когда приток пресной воды ближе к середине губы наиболее высок. Возможно, более точные результаты по дальности проникновения морских вод могут быть получены при учете приливов, что в приведенных расчетах не делалось.

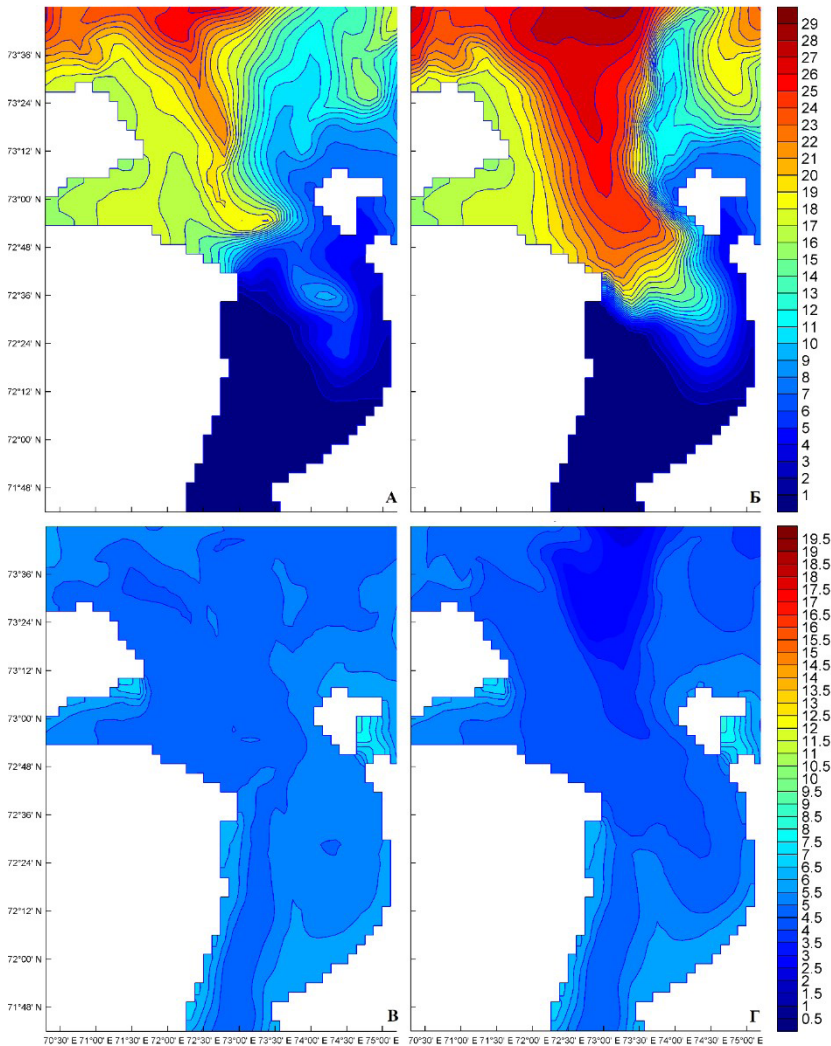


Рис. 2. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) соленость, ‰, а также поверхностная (В) и придонная (Г) температура воды, °С, в северной части Обской губы в полночь 14 августа

Избыточное вертикальное перемешивание может быть отчасти связано с использованием при расчетах т.н. σ -координат, которые хорошо работают при больших перепадах уровня воды, но порождают искусственно вертикальный обмен.

Температуры в области галоклина также несколько завышены, что может быть вызвано, в частности, тем, что расчетный алгоритм программного комплекса Delft3D в базовом варианте не работает при отрицательной температуре воды и, следовательно, нуждается в модификации. Поэтому приходилось искусственно завышать температуру воды на морских гра-

ницах расчетной области и температуре замерзания. Также может оказать влияние и то, что в этих расчетах для экономии времени был отключен ледодинамический блок, описывающий деформацию ледового покрова и его механическое разрушение. Возможно, полынья может быть ответственной за дополнительное выхолаживание моря.

Расчетная температура над галоклином за период летней экспедиции меняется от 3.5–4 °С до 5–6 °С против порядка 4–4.5 °С согласно приведенным в [13] рисункам. Разница в придонной температуре еще выше – по расчетам от 2.5–3.5 °С в начале экспедиции до 4–6 °С в ее конце против 0–6 °С (в среднем порядка 1–1.5 °С). Тут еще нужно учитывать, что придонный слой включает районы мелководья, где он расположен недалеко от поверхности. Кроме того, стоит отметить, что во время летней экспедиции на район галоклина приходилось только 2 полных створа, то есть приведенные в [13] изотермы и изогалины в значительной степени условные.

Осенняя экспедиция

В [13] утверждается, что в период осенней съемки вследствие уменьшившегося в 2 раза речного стока на первый план вышли атмосферные факторы. В «речной» части губы отмечается очень высокая степень перемешанности всей толщи воды, температура колеблется около отметки 3.5 °С. Исчезла струйность потока, пятна относительно высоких температур лишь отмечают направление оси Обского потока. Акватория губы разбивается на небольшие плотностные и температурные ячейки, что является следствием высокой динамики происходящих процессов, вызванных сильнейшими штормами и связанными с ними сгонами-нагонами. Все это приводит к постоянным изменениям вектора действующих потоков.

В расчетах также имеет место почти полная вертикальная перемешанность в «речной» части губы. Однако пространственная изменчивость метеоданных задавалась довольно грубо, путем триангуляции данных на небольшом количестве метеостанций. Временное же разрешение (выдачи результатов расчета) составляло одни сутки. Возможно поэтому, а также из-за грубой сетки расчетное распределение температуры носит более упорядоченный характер (см. рис. 3). В средней части губы у восточного берега, а также у устья Оби наблюдаются пятна тепла. Но на севере, а также на мелководном баре в южной части губы, не затронутой экспедиционными исследованиями, температура была гораздо ниже. Особенно низкой она была на береговых отмелях. В начале экспедиционного периода, 18 сентября, расчетная температура менялась в пределах 2.5–7 °С (по всей видимости, измерения в это время проводились в северной части губы). К концу экспедиционного периода, 7 октября, такая картина в целом сохраняется, но тепловое пятно в средней части губы смещается и,

действительно, теряет свою форму, почти распадаясь на отдельные пятна. Расчетная температура при этом меняется в пределах от 0°C до $4\text{--}4.5^{\circ}\text{C}$. На большей части исследованного экспедицией «речного» участка губы от м. Каменный до м. Хонарасаля температура была действительно порядка 3.5°C .

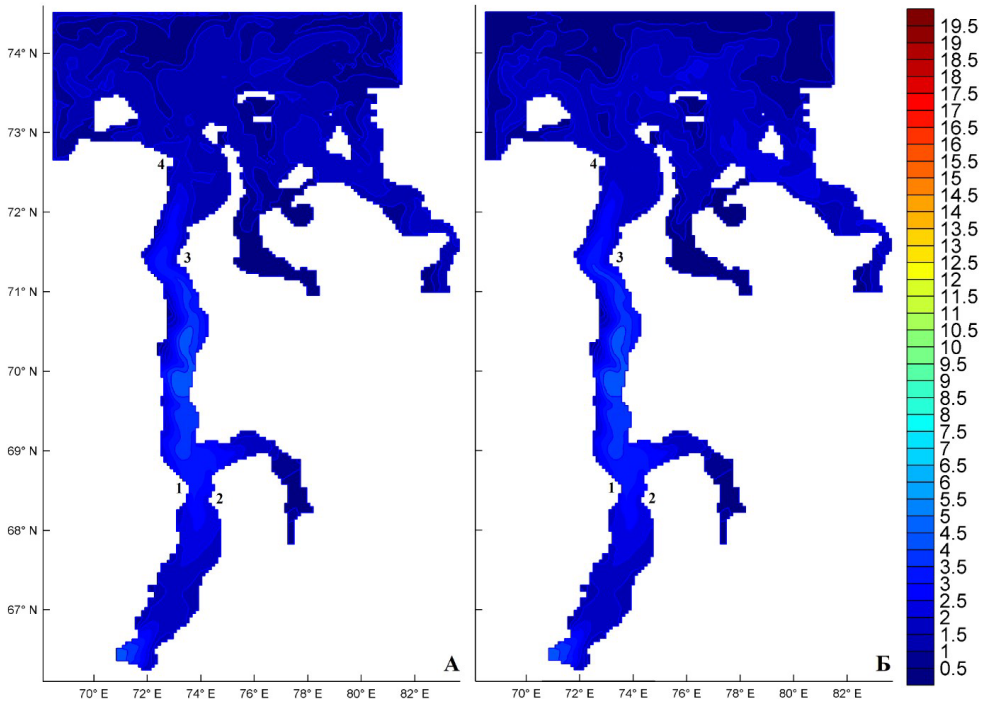


Рис. 3. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) температура воды в полдень 7 октября, $^{\circ}\text{C}$

Примечание: 1 – м. Каменный, 2 – м. Парусный, 3 – м. Хонарасаля, 4 – м. Дровяной

На приведенных в [13] рисунках видно, что наиболее теплые пятна с температурой порядка 4°C действительно тяготеют к глубоководным районам около восточного берега в средней части губы.

Описанного в [13] отжима вод Тазовской губы к ее левому берегу ветровым нагоном в результатах расчетов в явном виде обнаружить также не удалось.

Расчетная температура в северной части губы в период второй экспедиции меняется примерно от $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ 17 сентября до $1.5\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$ 7 октября против примерно $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ по рисункам из [13].

Согласно [13], к осени зона контакта соленых и пресных вод в северной части губы преодолела отметку 72° с.ш. и сместилась в южном направлении на $30\text{--}40$ км. Речной сток севернее $71^{\circ}50'$ с.ш. на фоне уменьшаю-

щейся водности все более тяготеет к левому берегу и отжимается солеными водами как со дна, так и с восточной стороны, где у поверхности по оси 73°20' в.д. – 73°30' в.д. обозначился фронт солености (в тексте 72°20' в.д. – 72°30' в.д., но это, очевидно, опечатка), а восточнее, вне зоны активного влияния речного стока, сформировалась промежуточная водная масса, для которой характерна большая однородность верхнего перемешанного слоя.

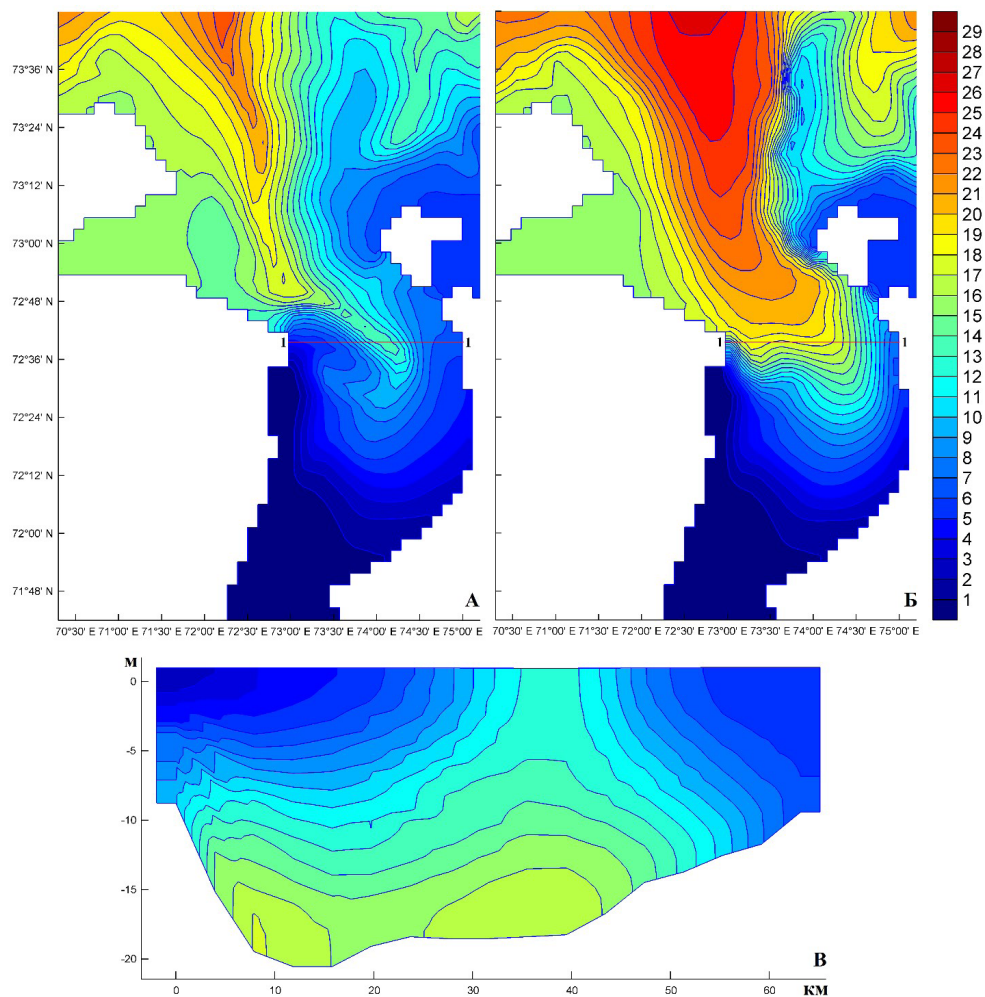


Рис. 4. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) соленость в северной части Обской губы, а также соленость на разрезе 1–1 (м. Дровяной, створ 17) в полдень 2 октября, ‰

В расчетах осенью также наблюдается подобие упомянутого солевого фронта примерно на том же меридиане (см. рис. 4). Соленые воды так же

продвигаются на юг больше, чем летом, но все же меньше, чем по данным наблюдений. Например, в придонном слое изогалина 10 ‰ в расчетах продвигается на юг до 72°23' с.ш., а согласно рисункам из [13] – примерно до 72°07' с.ш., изогалина 1 ‰ – до 71°54' с.ш. против примерно 71°37' с.ш. Кроме того, в поверхностном слое зона повышенной минерализации на востоке не доходит до берега, возможно из-за неучета приливов (определенную роль мог сыграть также завышенный сток Енисея). Поэтому в расчетах наблюдается течение не только вдоль западного, но и вдоль восточного берега.

На рис. 4. можно видеть, что, по расчетам, как и в [13], на створе 19 (72°15' с.ш.) ширина упомянутого потока трансформированных Обских вод у западного берега порядка 30 км и он хорошо перемешан по вертикали, а к створу 17 (м. Дровяной, 72°40' с.ш.) он уже оторвался от дна, имеет высоту порядка 5 м и значительно меньшую ширину. Здесь, как и в [13], условной границей этого потока считается изогалина 6 ‰. Далее на восток и вплоть до восточной прибрежной струи верхний перемешанный слой однороден.

Расчетная соленость вне зон активного поверхностного стока на створе м. Дровяной 2 октября (рис. 4) составила около 17–19 ‰ у дна и до 13 ‰ у поверхности. В [13] указываются величины в 20–25 ‰ и 8–9 ‰. Предположительно съемка была сделана в близкую дату.

Результаты расчета толщины льда

Согласно расчету, лед появляется в середине октября 2010 г. около берегов в южной части Обской, Тазовской и Гыданской губ и Енисейского залива, а также около островов на границе с морем. Затем прибрежные ледовые поля в южной части заливов смыкаются и распространяются на север. Ближе к концу месяца ледовые поля появляются у берегов и в остальной части Обской губы, а затем они также смыкаются. Но устье Оби какое-то время остается свободным ото льда. Оно замерзает последним, в начале ноября.

Наибольшая расчетная толщина льда (1–1.5 м) достигается в начале мая (см. рис. 5). Наибольшее значение (1.5 м) достигается в средней части Тазовской губы. Непосредственно в Обской губе наибольшая расчетная толщина льда (1.3–1.4 м) имеет место примерно между Новым портом и Тазовской губой, а также на мелководьях у левого берега от Тазовской губы до м. Поруй (южнее пос. Сабетта). А наименьшая (1 – 1.1 м) – на юге и в глубоководном районе в северной части Обской губы.

В первой–второй декадах мая толщина льда в районах впадения притоков начинает уменьшаться, но в некоторых других районах ее рост продолжается до третьей декады, после чего уменьшение становится повсеместным. В первой декаде июня ото льда освобождается устье р. Оби,

в третьей – р. Таза, Пура и Енисея. В первой декаде июля ото льда освобождается Енисейский залив и устье р. Гыды. К концу этой декады, согласно расчету, ледовый покров сохраняется только на шельфе в районе Гыданской губы, около о. Белый, а также на севере Обской губы между м. Хонарасалья (севернее пос. Сабетта) и м. Дровяной и у ее левого берега от м. Хонорасалья до м. Хасрё (около пос. Сеяха). В начале второй декады июля Обь-Тазовская устьевая область полностью освобождается ото льда.

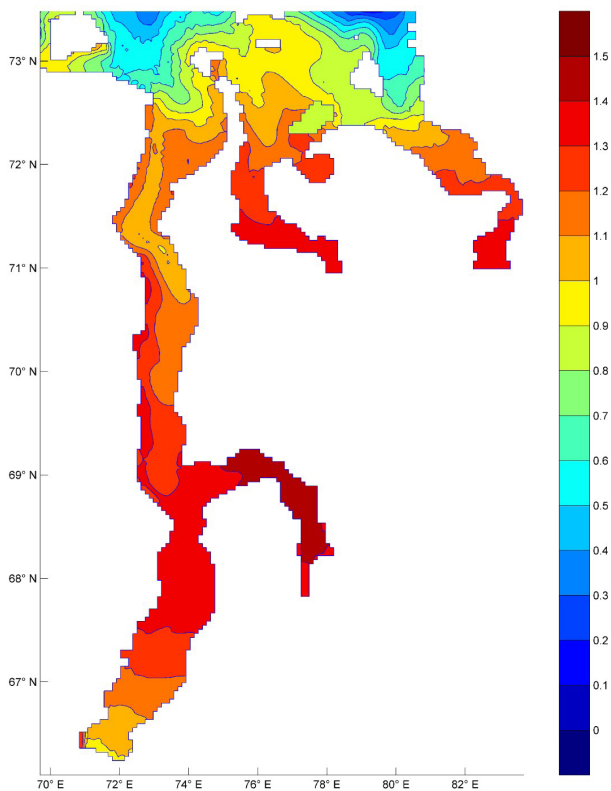


Рис. 5. Расчетная толщина льда, м, в Обь-Тазовской устьевой области на 10 мая 2010 г.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными наблюдений. По данным ИСЗ Terra/Aqua MODIS, ледостав в 2009 г. в южной и центральной частях Обской губы начинается 20 октября, а ледотаяние в 2010 г. заканчивается 13 июля [14]. В среднем (1947–2010 гг.) толщина льда в Обской губе на конец апреля достигает 1.4–1.7 м [15].

Спутниковые данные по толщине льда в указанном районе за зиму 2009–2010 гг. найти не удалось, а расчет за следующую зиму был неполным и завершался с концом календарного года. Поэтому было выполнено сравнение результатов расчета с комбинированными спутниковыми

данными CryoSat-2&SMOS [16] за середину декабря 2010 г. По результатам расчета, толщина льда в южной части губы составила 0,2–0,4 м, в центральной (от м. Каменный до м. Хонорасаля) и северной – 0,3–0,6 м. А по спутниковым данным, соответственно, 0,1–0,2 м, 0,1–0,6 м и 0,5–0,9 м. То есть, по сравнению со спутниковыми данными, расчет дает большую толщину льда в южной и меньшую в северной части губы. Это может быть вызвано, например, переносом молодого льда с юга на север, что в описываемом расчете не учитывалось. Кроме того, калибровка ледового блока модели выполнялась по максимальной толщине льда, то есть в начале зимы расхождение с натурными данными должно быть больше.

Заключение

Модель адекватно описывает термохалинный и ледовый режим в «речной» части Обской губы, но для более точного описания процессов взаимодействия речных и морских вод желательно учитывать дополнительные факторы, такие как приливы, зависимость температуры замерзания от солености и более детально описывать процессы вертикального перемешивания. Также возможно, что более точная оценка распределения толщины льда по акватории может быть получена при учете деформации ледового поля под воздействием внешних механических нагрузок.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Исследование разнообразия и структурно-функциональной организации водных экосистем для сохранения и рационального использования водных и биологических ресурсов Западной Сибири») и НИИР «Комплексные научные исследования Обской губы в рамках реализации проекта «Экологическая безопасность Обь-Иртышского речного бассейна» по договору с Некоммерческим Партнерством «Российский Центр освоения Арктики».

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the state assignment of IWEP SB RAS (project “Study of the diversity and structural and functional organization of aquatic ecosystems for the conservation and rational use of water and biological resources of Western Siberia”) and the research project “Comprehensive scientific research of the Gulf of Ob within the framework of the project “Ecological safety of the Ob-Irtysh River Basin” under an agreement with the Non-Commercial Partnership «Russian Center for Arctic Development».

Список источников

1. Delft3D-FLOW. User Manual. Version 4.05. Delft: Deltares, 2023. 701 p. [Электронный ресурс]. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf (дата обращения 17.05.2023).
2. Goede E.D. de, Graaff R.F. de, Wagner T., Sheets B. Modelling of ice growth and transport on a regional scale, with application to Fountain Lake // Proceedings of the 33rd International conference on offshore mechanics and Arctic engineering. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.658.6719&rep=rep1&type=pdf>. (дата обращения 14.09.2023).
3. Rayan P.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds. // Water resources research. 1974. Vol. 10. № 5. P. 930–938.
4. Wake A., Rumer R.R. Modeling ice regime of Lake Erie. // Journal of the Hydraulics Division. 1979. Vol. 105. № 7. P. 827–844.
5. 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.
6. Семчуков А.Н., Захаров В.П. Математическое моделирование термохалинного режима Обской губы с помощью программного комплекса Delft3D: построение цифровой модели рельефа дна, подготовка входных данных и пробные расчеты // Научный вестник ЯНАО. 2019. № 2 (103). С. 52–59.
7. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2009 г. Т. 1. РФ. Вып. 10. Бассейн Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Новосибирск: Зап. Сиб. УГМС, 2010. 320 с.
8. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2010 г. Т. 1. РФ. Вып. 10. Бассейн Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Новосибирск: Зап. Сиб. УГМС, 2011. 368 с.
9. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2009 г. Т. 1. РФ. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Красноярск: Среднесибирское УГМС, 2010. 274 с.
10. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2010 г. Т. 1. РФ. Вып. 12. Бассейн

- Енисей (без бассейна Ангары) и Пясины. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Красноярск: Среднесибирское УГМС, 2011. 310 с.
11. LEVITUS94 [Электронный океанографический атлас]. URL: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94/index.html> (дата обращения 01.03.2019).
 12. Meteomanz.com [База метеорологических данных]. URL: <http://www.meteomanz.com> (дата обращения 01.03.2019).
 13. Лапин С.А. Гидрологические характеристики Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
 14. Тарасенко А.Д., Селюженко В.В., Сандалюк Н.В., Абрамова И.А., Демчев Д.М. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48–63.
 15. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2017. 186 с.
 16. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // The Cryosphere. 2017. Vol. 11. № 4. P. 1607–1623.

Сведения об авторах

Александр Николаевич Семчуков, 1973 г.р., в 1994 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «механика и прикладная математика». С того же года работает в Новосибирском филиале Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул). Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Область научных интересов: математическое моделирование термогидродинамических и экологических процессов в водоемах и водотоках.

Владимир Викторович Кириллов, 1953 г.р., в 1978 г. окончил Новосибирский государственный университет по специальности «биология». С 1991 г. работает в Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул). Кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией Водной экологии. Область научных интересов: экология озер, рек и водохранилищ, речных систем и их водосборных бассейнов.

Участие авторов

Семчуков А.Н. – подготовка входных данных, расчеты, анализ результатов, написание текста статьи.

Кириллов В.В. – постановка задачи, написание текста статьи, научное редактирование.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 17.09.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on September 17, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.