

ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИЛИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГУБЕ КЕРЕТЬ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ, БЕЛОЕ МОРЕ)

© В. В. ИОНОВ,¹ Р. И. МАЙ,² Р. Е. СМАГИН³

Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: ¹ victor@vi3787.spb.edu

² rimay@mail.ru

³ rsmagin@yandex.ru

В статье описана модель губы Кереть, основанная на алгоритмах известной численной гидродинамической модели Принстонского университета POM (Princeton Ocean Model). Численные эксперименты с различными граничными условиями показали, что качество результатов моделирования таких небольших акваторий полностью обуславливается граничными условиями. Было определено, что использование только колебаний уровня моря или только течений на открытой границе дает неудовлетворительные результаты. Наилучший результат моделирования возможен лишь при использовании на открытой границе комбинации условия задания приливных течений и условия излучения по отклонению заданного уровня моря от уровня, воспроизводимого моделью. Сравнение результатов моделирования с данными инструментальных наблюдений показало, что модель очень точно воспроизводит приливные колебания уровня моря и приливные течения: коэффициент парной корреляции между измеренным и моделируемым уровнем моря близок к единице, аналогичный коэффициент между измеренными и моделируемыми течениями составил 0.9. Среднеквадратическая ошибка почти в 2 раза меньше допустимой погрешности как для уровня моря, так и для течений.

Анализ колебаний уровня моря, воспроизведенных моделью, показал, что изменение уровня моря происходит практически синхронно на всей исследуемой акватории, но существует небольшое запаздывание (на несколько минут) наступления полной воды в проливе Подпахта и губе Лебяжьей относительно момента наступления полной воды непосредственно в губе Кереть. С помощью гармонического анализа были рассчитаны характеристики эллипсов приливных течений для 16 составляющих прилива. Выявлено, что максимальные за один месяц течения (до 80 см/с) отмечаются в узких мелководных частях пролива Подпахта; непосредственно в губе Кереть максимальные приливные течения превышают 30 см/с в узкостях проливов Средняя Салма и Узкая Салма. Приливные течения преимущественно реверсивные.

По результатам моделирования приливных колебаний уровня моря и течений были оценены остаточные приливные явления: остаточный приливный уровень по всей акватории почти совпадает со средним уровнем моря. В поле остаточной приливной циркуляции выделяются циклонические круговороты в губе Лебяжьей, проливе Подпахта и в центральной части губы Кереть. Циркуляции в губе Лебяжьей и проливе Подпахта имеют заметные скорости и, по нашему мнению, формируют там общую циркуляцию. С помощью численной модели были оценены площади затопляемой во время прилива территории и статистические параметры ее временной изменчивости.

Созданная модель раскрывает новые возможности исследования распространения речных вод, формирования термохалинной структуры, расчета переноса пассивных примесей (загрязнение, планктонные формы жизни).

Ключевые слова: численная гидродинамическая модель, приливные течения, приливные колебания уровня моря, остаточная приливная циркуляция, приливная осушка, Белое море, губа Кереть.

...ученые-теоретики, которым удалось вывести ряд выдержавших проверку сложных уравнений, настолько осмелели, что возникла новая опасность: как бы изучение волн не перешло окончательно в руки людей, ни разу в жизни не видевших моря!

Виллард Баском («Волны и пляжи», 1966)

Введение. Кафедра океанологии СПбГУ на протяжении последних лет изучает режим приливных движений вод в губе Кереть. С помощью инструментальных измерений были выявлены особенности приливных колебаний

уровня моря [2] и приливных течений в некоторых точках акватории [3], определены закономерности изменений вертикального распределения температуры и солености в различных районах устьевой зоны [14].

Анализ разрозненных данных наблюдений не дает возможности оценить пространственное распределение исследуемых гидрофизических характеристик и определить временную изменчивость их полей. Восполнить недостаток данных может численная гидродинамическая модель, которая позволяет получить практически непрерывное четырехмерное пространственно-временное распределение гидрофизических характеристик акватории. Однако при использовании численного моделирования следует помнить, что модель воспроизводит только те процессы, которые описываются уравнениями гидродинамики, заложенными в модель, и только те явления, которые отвечают заданным граничным условиям. К тому же сами методы численной аппроксимации уравнений модели также имеют свои недостатки и особенности, влияющие на точность расчета; различные приближения отсекают некоторые процессы и явления динамики вод; многие основополагающие факторы, такие как, например, турбулентность, вязкость и диффузия, воспроизводятся с помощью различных параметризаций, в том числе и эмпирических.

По-видимому, первое применение численной гидродинамической модели для изучения приливных движений вод в губе Кереть было выполнено Р. Э. Здравенновым [1]. В этой работе использовалась модель CARDINAL [4], основанная на уравнениях движения и неразрывности в приближении мелкой воды, для исследования приливной динамики вод различных заливов Белого моря, в том числе и для губы Кереть. С помощью этой модели рассматривалось изменение осредненной по глубине концентрации консервативной примеси под действием приливных движений и речного стока [1]. В работе было установлено, что скорости приливных течений не превышают 10 см/с на большей части акватории. Выявлено, что изменение приливного колебания уровня моря происходит синхронно по всей акватории Средней Салмы.

Трехмерный вариант модели CARDINAL для губы Чупа и прилегающих акваторий применялся в работах [9–11, 13]. Авторы этих работ делают вывод о том, что наиболее интенсивные течения на акватории — приливные, второе место занимают стоковые течения [13]. В работе [9] указывается, что в губе Кереть модуль скорости течения за весь приливо-отливный период колебался от 5 до 12 см/с. Следует отметить, что в этих работах приливные явления воспроизводятся через задание на открытой границе колебания уровня, аппроксимируемого простой гармонической функцией с полусуточным периодом. В работе [1] фазовые неравенства прилива имитируются изменением амплитуды этой гармонической функции. Ни в одной из указанных работ нет привязки к астрономическим параметрам, не были вычислены гармонические постоянные приливных течений. В основном существующие работы [1, 9–11, 13] исследовали распространение речных вод в бассейне с периодически колеблющимися водами. Причем в этих моделях лишь качественно воспроизводятся приливные явления. Кроме того, ни в одной из упомянутых работ нет оценок качества моделирования. Это можно объяснить тем, что ряды инструментальных измерений уровня моря и течений, позволяющие оценить качество моделирования, появились относительно недавно [2, 3].

Описание модели губы Кереть. Для определения приливных движений вод в губе Кереть была использована известная модель Принстонского университета POM (Princeton Ocean Model) [15]. В модели POM используется сет-

ка «С» по классификации Аракавы для аппроксимации пространственных производных конечно-разностными аналогами, система уравнений движения и неразрывности реализована в так называемых сигма-координатах, где вертикальная дискретизация выполнена не для горизонтов с фиксированной толщиной, а для заданного количества слоев. В модели ROM для оптимизации расчета на компьютере разделены вертикально интегрированные уравнения (двумерный модуль) и уравнения вертикальной структуры (трехмерный модуль). По уравнениям в приближении мелкой воды рассчитываются колебания уровня, вертикально интегрированные течения, вертикально осредненный поток тепла и соли, затем по полученным параметрам в трехмерном модуле рассчитываются три составляющие течения и изменение температуры и солености во всех сигма-слоях модели. Модель ROM содержит полные уравнения термодинамики и уравнения расчета параметров турбулентности по известной модели Мелора—Ямады [17].

Модель ROM применялась для воспроизведения динамики и термодинамики различных акваторий: от Мирового океана, океанов и морей до бухт, эстуариев, рек и даже небольших озер, расположенных на суше [16, 19]. Несмотря на то что имеется положительный опыт применения модели ROM для акваторий с пространственным шагом от 10 м [16, 19], следует помнить, что многие явления с таким пространственно-временным масштабом (конвекция, ветровые волны) по определению не могут быть воспроизведены из-за особенностей приближений, в которых записаны уравнения модели. Основным предмет нашего исследования — это приливные явления, т. е. движения, имеющие характерные масштабы, намного превышающие сотни метров, и, следовательно, основные приближения (гидростатика, мелкая вода для двумерного модуля), заложенные в модели ROM, позволяют раскрыть основные особенности динамики приливных явлений.

После рассмотрения многих вариантов сеточных областей (в том числе и в криволинейных координатах) мы пришли к выводу, что прямоугольная сеточная область с горизонтальным пространственным шагом 33 м наиболее оптимальна для детального описания рельефа дна и береговой линии акватории губы Кереть. На рис. 1 представлена сеточная область модели губы Кереть. Для того чтобы водообмен через проливы, определяющий приливную динамику губы, не был искажен влиянием грубой аппроксимации прямоугольной сетки, сеточная область была повернута на угол 350° . При такой ориентации сетки проливы практически без искажений нашли свое отражение в матрицах модели (рис. 1).

Согласно критерию Куранта-Фредерикса-Леви, определяющему связь пространственного и временного шагов численной аппроксимации конечно-разностных уравнений, для рассматриваемой сетки временной шаг модели должен составить примерно полсекунды для решения уравнений мелкой воды (двухмерный модуль в модели ROM). Однако исследуемый район подвержен интенсивному влиянию приливных течений, и шаг модели по времени был уменьшен до 0.25 сек. Временной шаг для решения бароклинных уравнений движения и неразрывности (трехмерный модуль в модели ROM) составил 2.5 секунды.

На первом этапе предполагается исследовать приливные движения вод, которые по определению являются баротропными. Поэтому в данной работе описываются результаты моделирования трехмерной модели с однородными по горизонтали и вертикали полями температуры (12°) и солености (28 ‰). При такой термохалинной структуре даже трехмерная модель будет рассчи-

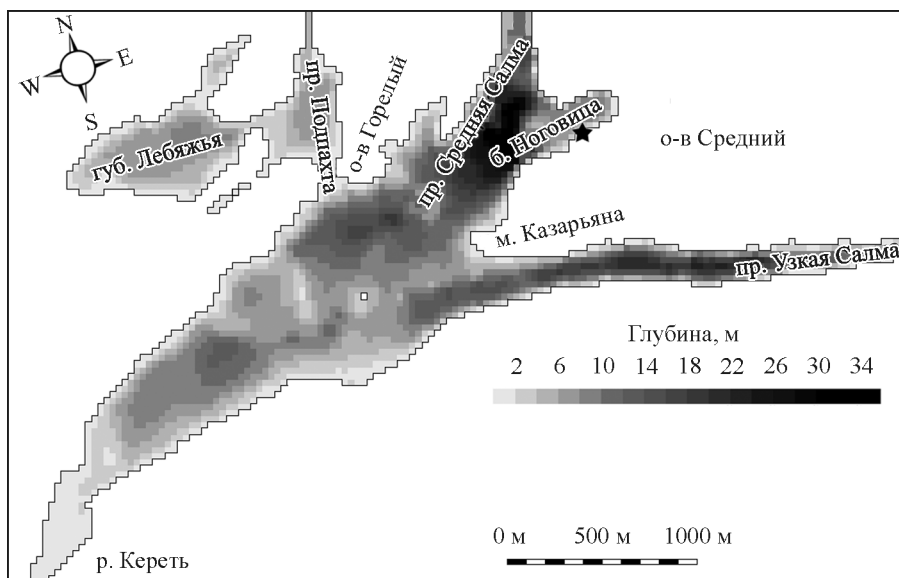


Рис. 1. Сеточная область модели губы Кереть.

Тон ячеек соответствует определенному диапазону глубин. Звездочкой указано положение поста измерения уровня моря.

тывать только баротропные приливные явления: приливные течения не будут меняться по глубине, за исключением придонного пограничного слоя. Все характеристики течений в данной работе рассчитаны по полю приливных течений на горизонте 3—4 м.

Начальными условиями модели служат невозмущенные поля течений и уровня моря, которые впоследствии выводятся из равновесия приливными колебаниями, заданными на открытой границе.

Граничные условия. В большинстве численных гидродинамических моделей на твердой границе, т. е. на границе между ячейками сеточной области модели, приходящимися на сушу и на море, задается условие скольжения — нормальная берегу компонента течений приравняется к нулю. Такое же условие заложено в модели POM. Для акваторий со значительными колебаниями уровня возникает другая проблема: при максимальном отливе или сгоне полная глубина моря (глубина плюс уровень моря) может быть равна нулю или даже быть отрицательной. Несмотря на то что такое явление в природе существует, в численных алгоритмах модели отрицательная полная глубина приводит к программным ошибкам в виде деления на ноль. При моделировании таких акваторий необходимо применять процедуры, воспроизводящие приливную осушку. В модели POM приливная осушка впервые была применена в работах [5, 18]. В работах [5, 6] было обнаружено, что приливная осушка (или ее аналог в модели) формирует остаточные приливные течения и мелководные гармоники. С 2008 г. на официальном сайте модели <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom> доступен код с возможностью подключения осушки.

Созданная сеточная область губы Кереть имеет три открытых границы в ячейках, соответствующих проливам Подпахта, Средняя Салма и Узкая Салма. Так как акватория губы сравнительно невелика, то очевидно, что ее

приливной режим полностью определяется характеристиками колебаний уровня моря и течений в проливах. Корректное задание граничных условий — залог приемлемых результатов численной гидродинамической модели. Существует множество вариантов задания условий на открытой границе. Наиболее простым представляется задание колебания уровня на открытых границах, когда высота уровня на открытой границе (ξ_{bc}) приравнивается к известным или рассчитанным высотам уровня моря (ξ_{data}):

$$\xi_{bc} = \xi_{data}. \quad (1)$$

Именно такое условие задавалось в модели CARDINAL в работах [1, 9–12]. Аналогично можно задать течения на открытой границе (u_{bc}):

$$u_{bc} = u_{data}, \quad (2)$$

где u_{data} — течения, известные по данным измерений или расчета.

Задание таких условий приводит к неверному воспроизведению течений или колебаний уровня вследствие того, что в приливной волне фазы колебания уровня моря и течений отличаются в зависимости от вклада поступательной и стоячей составляющих. Поэтому при моделировании приливных волн на открытой границе предпочтительно задавать условие излучения волны: когда колебания уровня и течений формально связаны через скорость распространения длинных гравитационных волн, например:

$$u_{bc} = \xi_{data} \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad (3)$$

где ξ_{data} — известные колебания уровня моря, g — ускорение свободного падения, H — глубина моря.

Наиболее интересен вариант условия излучения, учитывающий не только колебания уровня моря на открытой границе, но также и изменение течений [8, с. 246]:

$$u_{bc} = u_{data} + (\xi - \xi_{data}) \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad (4)$$

где ξ — колебания уровня моря возле открытой границы, воспроизведенные моделью. Такое граничное условие представляет собой комбинацию условия задания течений (2) и излучения (3). Второе слагаемое правой части уравнения (4) описывает поправку на возмущение, сгенерированное внутри расчетной области.

Во всех приведенных выше граничных условиях необходимо задавать колебания уровня моря (ξ_{data}) или/и течения (u_{data}) в узлах сеточной области, приходящихся на проливы Средняя Салма, Узкая Салма и Подпахта. В нашем распоряжении имелись гармонические постоянные для 16 волн приливного колебания уровня [2] и гармонические постоянные 4 основных приливных гармоник для приливного течения [3]. Именно по этим данным предвычислялись колебания уровня моря и течения, которые впоследствии задавались в качестве условий на открытой границе.

Верификация модели. Перед интерпретацией результатов моделирования необходимо убедиться в том, что модель корректно воспроизводит интересующие нас явления, т. е. выполнить верификацию модели. Верификация

Оценки качества моделирования уровня моря и течений при различных граничных условиях

Условия на открытой границе		Уровень моря			Течения		
		RMSE, см	MAE, см	r	RMSE, см/с	MAE, см/с	r
$\xi_{bc} = \xi_{data}$	(1)	12.7	10.7	0.98	22.7	15.3	0.49
$u_{bc} = u_{data}$	(2)	44.2	39.9	0.85	13.5	10.9	0.78
$u_{bc} = u_{data} + (\xi - \xi_{data})\sqrt{\frac{g}{H}}$	(4)	15.6	12.9	0.97	9.8	7.5	0.88

Примечание. RMSE — среднеквадратическая ошибка результатов моделирования, MAE — средняя абсолютная ошибка результатов моделирования, r — коэффициент парной корреляции между рядами измерений и результатами моделирования.

производится сравнением результатов моделирования с данными измерений. Принято использовать следующие критерии оценки качества моделирования: RMSE — среднеквадратическая ошибка результатов моделирования, MAE — средняя абсолютная ошибка результатов моделирования, r — коэффициент парной корреляции между рядами измерений и результатами моделирования. Допустимая погрешность результатов моделирования может быть оценена по формуле

$$\delta = 0.674 \times \sigma,$$

где σ — среднеквадратическое отклонение моделируемого явления [7]. Как известно, среднеквадратическое отклонение уровня моря в губе Кереть, по данным инструментальных измерений, составляет 51.9 см [2], а большая ось эллипса среднеквадратического отклонения течений в проливе Средняя Салма достигает 25.6 см/с [3]. Следовательно, допустимая погрешность модели для уровня моря (δ_ξ) составляет 33.6 см и 16.6 см/с — для течений (δ_u).

Результаты моделирования сравнивались с данными инструментальных измерений уровня моря и течений, выполненных летом 2013 г. в губе Кереть. Длина ряда измерений течений, по которым проводилась верификация, составила 100 ежечасных значений с тремя пропусками. Длина ряда измерений уровня моря составила 577 ежечасных значений. Для оценки качества моделирования были использованы только записи синхронных измерений уровня моря и течений. Оценки качества моделирования колебания уровня моря, рассчитанные по данным измерений длиной 577 и 100 значений, показали примерно одинаковые результаты.

Как видно по данным таблицы, задание граничных условий в виде (1) дает приемлемые результаты лишь для уровня, в то время как для течений среднеквадратическая ошибка (RMSE) превосходит допустимую погрешность (δ_ξ) и коэффициент парной корреляции (r) не превышает 0.5. Результаты моделирования с использованием граничных условий (2) также дают неприемлемый результат: среднеквадратическая ошибка уровня моря превосходит допустимую погрешность.

Использование «саморегулирующихся» граничных условий (4) дало следующие показатели качества моделирования: коэффициенты парной корреляции между рядами измерений и результатами моделирования составили 0.97 для колебаний уровня моря и 0.88 для продольной составляющей течений в про-

ливах; среднеквадратическая ошибка как для уровня (15.6 см) так и для течений (9.8 см/с), существенно меньше допустимых погрешностей δ_ξ и δ_u . Таким образом, качество моделирования с граничными условиями (4) можно признать приемлемым, а модель верифицированной.

Результаты модельных расчетов. *Приливные колебания уровня моря и приливные течения.* Результаты численного моделирования подверглись статистическому и гармоническому анализам. Было выяснено, что изменение уровня моря происходит практически синхронно по всей акватории губы Кереть. Амплитуды и фазы основных и мелководных гармоник в различных частях акватории имеют почти одинаковые значения. Существуют незначительные отклонения в пространственном распределении фаз в изолированных бассейнах. Например, фаза волны M_2 в проливе Подпахта на один градус больше, чем в губе Кереть. В губе Лебяжья фаза этой гармоники отличается от фазы в проливе Подпахта также на один градус и соответственно на два градуса от фазы в губе Кереть. Таким образом, полная вода в проливе Подпахта и губе Лебяжьей наступит примерно через 2 и 4 мин соответственно после наступления полной воды в губе Кереть. Такая тенденция изменения фаз в изолированных бассейнах (пролив Подпахта, губа Лебяжья) отмечается и для других основных составляющих прилива. Следует отметить, что отклонения фазы в 1—2 градуса меньше оценок 95%-го доверительного интервала. В практических целях для предвычисления колебаний уровня моря в любой точке губы Кереть целесообразно использовать гармонические постоянные из работы [2].

Как уже было установлено ранее по инструментальным данным [3], максимальное отклонение уровня моря от среднего и максимальные приливные течения находятся в противофазе, т. е. в данной акватории приливная волна имеет стоячий характер. На рис. 2 представлено характерное изменение полей течений за один приливной цикл: в момент малой воды течения в губе минимальны (рис. 2, а). С увеличением уровня прибрежной акватории Белого моря, называемой Большой Керетский Рейд, в проливы Средняя Салма, Узкая Салма и Подпахта поступает вода, и скорость течений в этих проливах постепенно растет. Максимальные приливные течения (т. е. течения, направленные в губу Кереть) приходятся на момент перехода приливного колебания уровня моря через нулевую отметку (рис. 2, б). Далее приливные течения постепенно замедляются и к моменту наступления полной воды (рис. 2, в) они практически отсутствуют. На полной воде приливное течение (из моря в губу) сменяется на отливное (из губы в море), которое достигает максимальных скоростей в момент перехода колебаний уровня через ноль (рис. 2, г). Описанная выше схема временного изменения полей приливных течений повторяется с каждым новым приливным циклом. Неравенства приливов влияют только на модули скорости приливных течений; структура течений и схема их изменений остаются прежними.

Обращают на себя внимание две особенности в структуре приливных полей: течения в проливах Средняя Салма и Узкая Салма практически синхронны, в различных частях пролива Подпахта отмечаются противонаправленные течения. Например, в момент максимального приливного течения (рис. 2, б) в северной части пролива Подпахта течения направлены с севера на юг, а в южной части — с юга на север, и наоборот при отливном течении (рис. 2, г). Это интересное явление впервые было описано в работе [12]. Тот факт, что модель воспроизводит необычную особенность приливной динамики пролива Подпахта, описанную по данным измерений, также свидетельст-

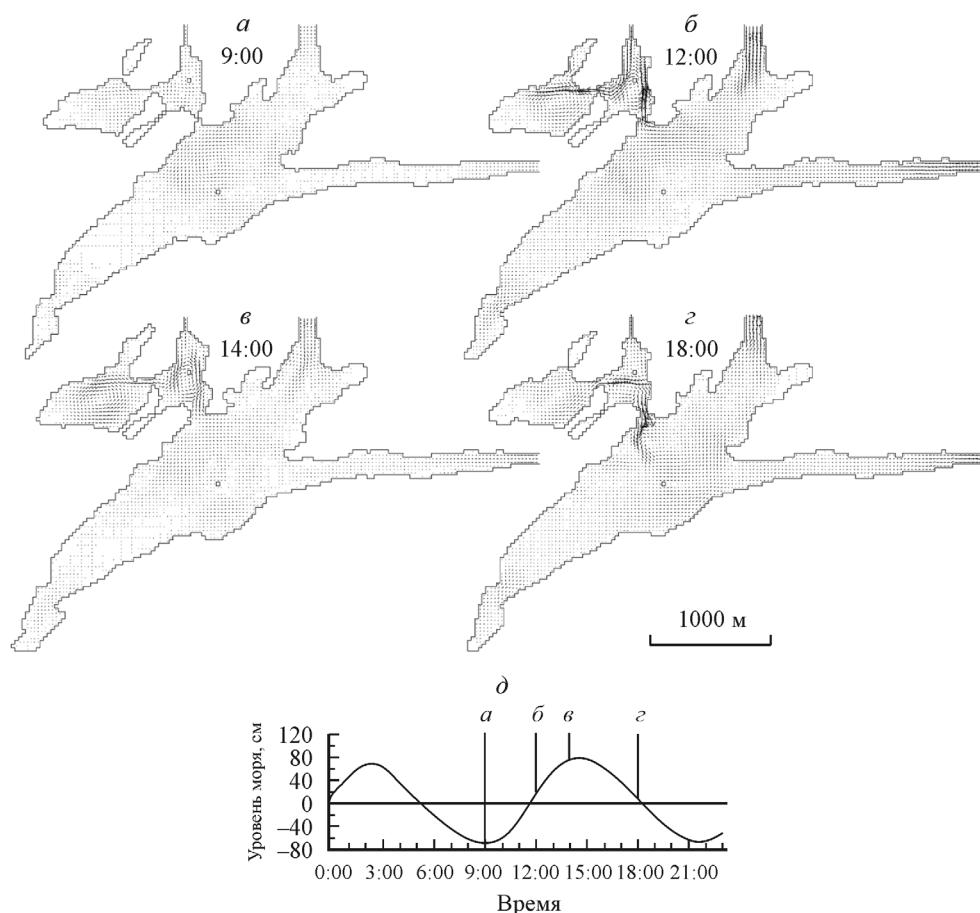


Рис. 2. Приливные течения и колебания уровня моря в губе Кереть 10 июня 2013 г. по данным моделирования.

а — течения в малую воду (9:00 UTC), *б* — максимальное за цикл приливное течение (12:00 UTC), *в* — течения в полную воду (14:00 UTC), *г* — максимальное за цикл отливное течение (18:00 UTC), *д* — приливные колебания уровня моря.

вует о высоком качестве результатов моделирования. Разнонаправленные течения пролива Подпахта объясняются тем, что этот пролив имеет соединение с губой Лебяжьей, которая выступает в роли некоего аккумулирующего бассейна. При увеличении приливного уровня моря для того, чтобы заполнить резервуар губы Лебяжьей, в пролив Подпахта поступают воды как из Большого Керетского Рейда, так и из губы Кереть. Когда уровень моря соседних акваторий уменьшается, накопленная ранее вода из губы Лебяжьей стремится в Большой Керетский Рейд и губу Кереть, вызывая в разных концах пролива Подпахта противонаправленные течения.

При моделировании приливов в течение месяца максимальное приливное течение (более 80 см/с) имеет место в мелководной части пролива Подпахта, примыкающей к губе Кереть. В проливе, соединяющем губу Лебяжью и пролив Подпахта, максимальные скорости течений достигают 50 см/с, в узкостях проливов Средняя Салма и Узкая Салма превышают 30 см/с. Максимальная скорость более 5 см/с отмечается на всей акватории проливов Средняя Салма,

Узкая Салма, Подпахта и губа Лебяжья, а также в зоне, примыкающей к устьевой области р. Кереть, более 1 см/с — практически по всей исследуемой акватории (рис. 3, а).

Полученные с помощью модели ряды приливных течений подверглись классическому гармоническому анализу. Были рассчитаны гармонические постоянные 16 составляющих прилива для каждой компоненты приливных течений. Полученные амплитуды и фазы внесены в цифровую базу данных, позволяющую предвычислять приливные течения в любой точке акватории на произвольный отрезок времени летнего периода.

Наибольший вклад в изменчивость приливных течений вносят течения с периодом главной лунной полусуточной гармоникой M_2 . Большая ось эллипса соответствует максимальной скорости приливного и отливного течения, малая ось — минимальным скоростям течений с периодом волны M_2 . Как видно из рис. 2, б, приливные течения волны M_2 преимущественно реверсивные (большая ось эллипса приливных течений в несколько раз превышает размеры малой оси). Область, где коэффициент сжатия эллипса (отношение малой оси эллипса к большой) превышает 0.5, локализована в центральной части губы Кереть, южнее пролива Подпахта и западнее мыса Казарьяна. Эта область вытянута преимущественно с севера на юг; ее местоположение определяется, скорее всего, взаимодействием приливных течений губы Кереть и вторгающихся из пролива Подпахта. Смена приливных течений волны M_2 в области с коэффициентом сжатия 0.5 и более происходит по часовой стрелке. Пространственное распределение фаз максимальной скорости приливных течений волны M_2 по всей акватории губы Кереть однородно (фаза максимального приливного течения составляет 120—150°). Амплитуды максимальных приливных течений (большие полуоси эллипса приливного течения) волны M_2 , равные и большие 20 см/с, наблюдаются в устьях проливов Подпахта, Средняя Салма и Узкая Салма. Амплитуда течений волны M_2 более 5 см/с отмечается в проливах Подпахта, Средняя Салма и Узкая Салма, в северной части губы Лебяжья, и в устье, находящейся возле устья р. Кереть. Амплитуды приливных течений более 1 см/с встречаются практически по всей исследуемой области, за исключением некоторых отдельных акваторий (бухта Ноговица, бухта острова Горелый и др.).

Следует еще раз подчеркнуть, что приливные течения в данной работе моделировались при отсутствии плотностной стратификации, т. е. рассчитанные течения являются баротропными.

Остаточные приливные явления. Приливные колебания уровня моря и течений представляют собой набор гармонических функций. В линейном приближении осреднение приливных колебаний (суммы гармонических функций) за отрезок времени, кратный периодам приливных гармоник, должен дать результат, близкий к нулю. Однако в действительности за счет нелинейных эффектов такое осреднение даст результат, отличный от нуля. В природе этот механизм приведет к появлению статического возвышения уровня моря и к генерации постоянного течения. Изменение среднего уровня моря за счет нелинейных эффектов можно назвать остаточным приливым уровнем, в некоторых работах это явление, обнаруженное по данным геодезических измерений, получило название приливной накачки уровня. Постоянные течения, вызванные передачей энергии от полусуточных и суточных приливных волн, называются остаточными приливыми течениями, а их система — остаточной приливной циркуляцией.

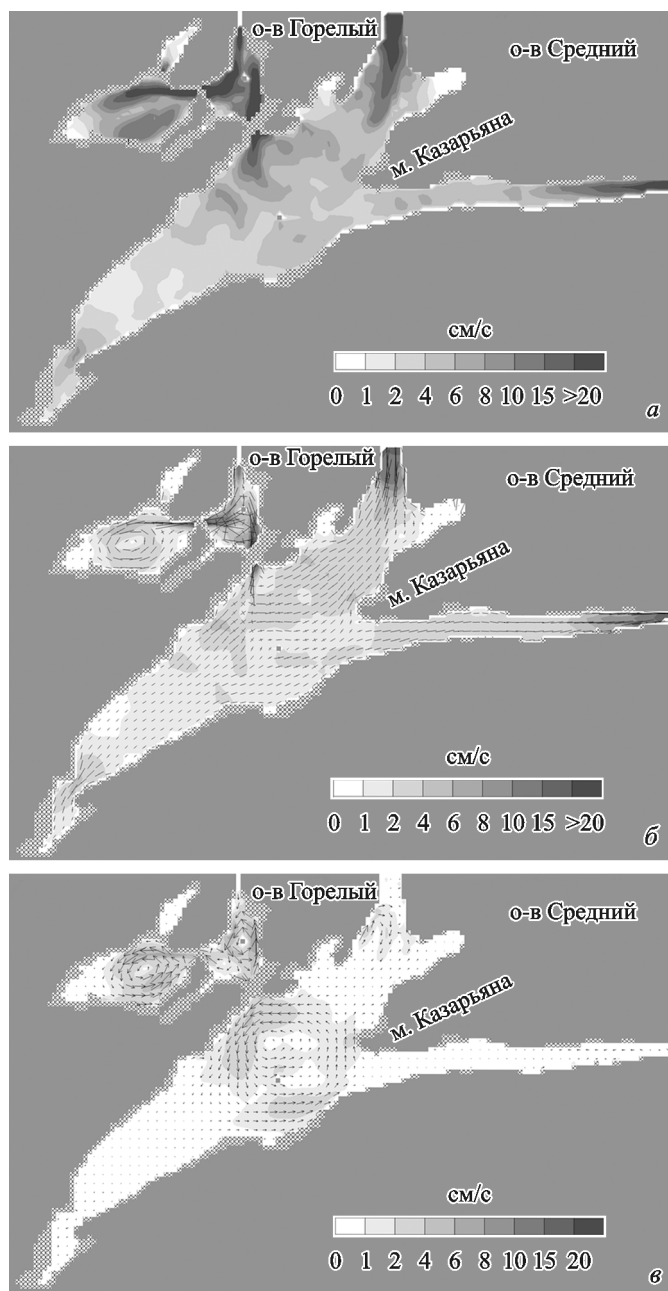


Рис. 3. Характеристики приливных течений в губе Кереть по данным модельного расчета. Заштрихованные ячейки приходятся на область приливной осушки. *а* — максимальное значение модуля скорости приливных течений по данным месячной реализации модели; *б* — эллипсы приливных течений главной лунной полусуточной волны M_2 , заливкой показана величина большой полуоси эллипса; *в* — осредненные за месяц скорости приливных течений.

В описанных выше экспериментах вынуждающая сила имеет только приливную периодичность, следовательно, можно заключить, что негармоническая составляющая в результатах моделирования вызвана исключительно нелинейными эффектами. Остаточный уровень и остаточная приливная циркуляция рассчитывались по результатам счета модели длиной один месяц. Для устранения гармонических составляющих, период которых не кратен длине ряда, дважды проводилась фильтрация скользящим средним с шагом один сутки. После чего по отфильтрованным данным простым осреднением определялись значения остаточного течения и остаточного уровня моря.

Остаточный приливный уровень моря в губе Кереть практически отсутствует: отклонение остаточного приливного уровня от среднего уровня моря не превышает нескольких миллиметров, что меньше, чем точность методов, применяемых для анализа. Следует подчеркнуть, что анализируемые здесь результаты моделирования получены без учета стока р. Кереть. Вклад речных вод безусловно изменит средний уровень моря и, более того, вызовет дополнительные нелинейные эффекты, связанные с взаимодействием речного стока и приливной волны.

Наибольший интерес представляют остаточные приливные течения, полученные по модельным расчетам. На рис. 3, в показана схема остаточной приливной циркуляции губы Кереть. Можно выделить три циклонических циркуляции: в проливе Подпахта, в губе Лебяжьей и в центральной части губы Кереть. Модуль скорости остаточных течений больше 5 см/с только в северной части губы Лебяжьей и в восточной части пролива Подпахта. Скорости остаточной приливной циркуляции в губе Кереть составляют 1—2 см/с, и лишь в северной части циркуляционной ячейки скорость превышает 3 см/с. Очевидно, что на остаточные течения в губе Кереть влияют течения из пролива Подпахта. Так как в данной работе описывается трехмерная, но все же баротропная модель, то схема остаточной приливной циркуляции на различных горизонтах идентична поверхностной. В реальных условиях, возможно, в губе Кереть остаточная приливная циркуляция будет незаметна на фоне стоковых, ветровых и приливных течений в стратифицированном море. Однако постоянные течения в губе Лебяжьей и проливе Подпахта должны выделяться в данных измерений течений.

Приливная осушка. По данным численного гидродинамического моделирования была оценена площадь прибрежной зоны, подвергавшейся периодическому затоплению и обсыханию в течение приливного цикла. Максимальное количество ячеек сеточной области модели, подверженных затоплению/обсыханию, составило 615 (670 тыс. м²), что соответствует примерно 18 % площади исследуемой акватории. Временной ход изменения площади приливной осушки имеет выраженную приливную периодичность, находящуюся в противофазе с колебаниями уровня моря. Среднее значение временного хода изменения площади приливной осушки составляет 400.5 тыс. м² (11 % от площади акватории губы Кереть), статистическая оценка временной изменчивости (среднеквадратическое отклонение) площади приливной осушки составила 171.5 тыс. м². Приведенные оценки площади приливной осушки рассчитывались простым умножением количества ячеек, через которые переместилась твердая граница расчетной области, на их площадь. Очевидно, что аппроксимация пространства прямоугольными ячейками со сторонами 33 м несет в себе известную погрешность, которая скажется на точности определения общей площади осушки. Тем не менее хорошее совпадение положения

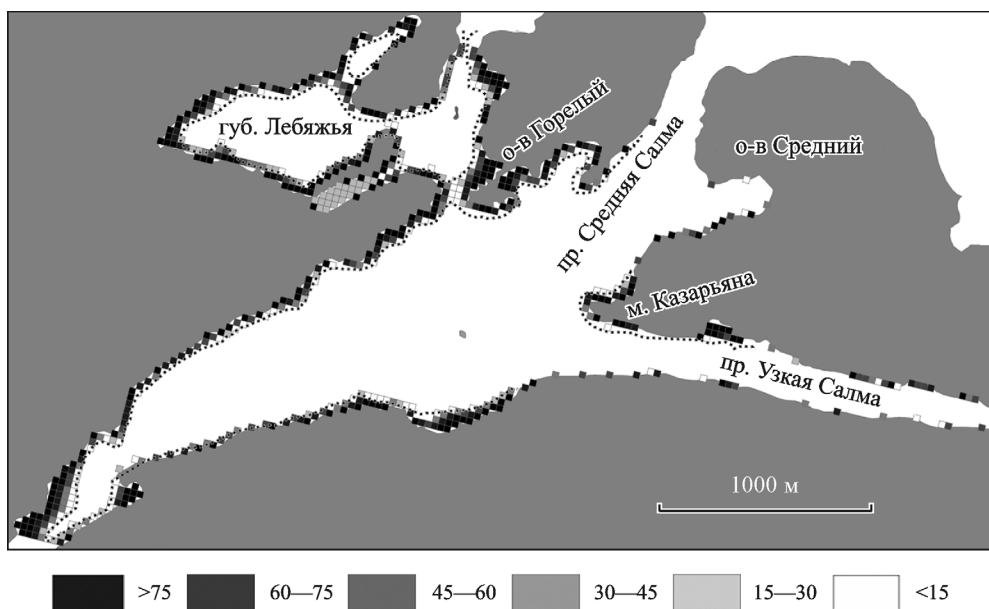


Рис. 4. Приливная осушка губы Кереть.

Пунктирная линия — граница приливной осушки по данным навигационной карты, ячейки — приливная осушка по данным численного моделирования. Цвет ячеек соответствует продолжительности осушки (в %) относительно всего времени моделирования.

границ приливной осушки с данными наблюдений позволяет предположить, что эта погрешность невелика.

На рис. 4 представлены площади приливной осушки, рассчитанные по модели и снятые с навигационной карты. Как видим, модель достаточно точно воспроизводит контуры приливной осушки, что косвенно также служит подтверждением хорошего совпадения результатов моделирования с наблюдаемыми явлениями в губе Кереть. Помимо оценок площади приливной осушки, для каждой ячейки рассчитана продолжительность нахождения «на воздухе». Мы считаем, что рассчитанные оценки повторяемости затопления и обсыхания побережья и полученные статистические оценки изменчивости площади приливной осушки будут полезны для экологических исследований литоральных зон губы Кереть.

Заключение. Исследование приливных эстуариев исключительно с помощью инструментальных рядов наблюдений не позволяет полностью раскрыть пространственные особенности изменения гидрофизических полей. В мировой практике сложилась схема изучения гидрологического режима таких акваторий с помощью совместного анализа данных измерений и результатов численного моделирования. Кафедра океанологии СПбГУ, следуя этой мировой тенденции, также дополнила свой арсенал средств и методов изучения губы Кереть верифицированной приливной моделью. Единственное недостающее звено в комплексном исследовании приливных явлений данной акватории теперь восполнено.

Созданная численная гидродинамическая модель губы Кереть имеет следующие преимущества перед существующими на настоящий момент моделями [1, 9, 11, 13].

Во-первых, проведено тщательное сравнение результатов моделирования со всеми имеющимися в нашем распоряжении данными инструментальных измерений уровня моря и течений. Выявлено, что наиболее точно результаты моделирования совпадают с данными измерений при задании на открытой границе колебаний уровня моря и течений через подстраиваемые условия излучения.

Во-вторых, впервые для данной акватории для задания граничных условий использованы гармонические постоянные приливного колебания уровня моря и течений. Таким образом, наша модель воспроизводит неравенства приливов, а результаты моделирования соотносятся с конкретными астрономическими условиями, приходящимися на заданный момент времени. Модель представляет собой точный прогностический аппарат, позволяющий рассчитать приливные явления на произвольный момент времени. Следует еще раз оговориться, что гармонические постоянные для уровня моря и течений получены для летнего времени и, следовательно, предвычисление не может корректно отразить возможные эффекты, связанные с воздействием ледяного покрова на уровень моря и течения, а также с сезонным изменением параметров приливной волны в Белом море.

В-третьих, модель реализована на сетке с высоким пространственным разрешением, что позволило учесть влияние пролива Подпахта и губы Лебяжьей на гидрологический режим губы Кереть.

В-четвертых, используемая модель позволяет учесть изменение береговой линии в зависимости от высоты прилива, что сказывается на точности ее аппроксимации как береговой линии и рельефа дна моря: в нашей модели воспроизводятся приливная осушка, супралиторальные и литоральные ванны.

С помощью модели удалось уточнить приливной режим губы Кереть, выявить особенности пространственного распределения характеристик приливного течения и приливного уровня. Полученная с помощью численного моделирования база данных гармонических постоянных приливных течений помещена в электронную систему прогнозирования приливных течений в губе Кереть. Теперь для этого района можно получить точный прогноз приливного колебания уровня моря и приливных течений с произвольной заблаговременностью.

На базе созданной и верифицированной модели приливных движений губы Кереть в ближайшем будущем будут созданы модели, позволяющие исследовать распространение речных вод, формирование термохалинной структуры, особенности взаимодействия приливных течений со стратифицированными водами и речным стоком. Кроме того, модель может быть дополнена граничными условиями потока тепла, влаги и импульса через поверхность. В этом случае мы получим универсальную прогностическую и диагностическую систему воспроизведения гидрологических параметров исследуемой акватории, учитывающую ветровое воздействие, турбулентные потоки тепла и влаги, радиационные потоки. Также представляется возможным учесть распространение консервативных и неконсервативных примесей, реализовать известные механизмы взаимодействия между этими примесями. В этом случае открываются новые возможности создания всевозможных биохимических и экологических моделей.

В качестве эпиграфа к этой статье мы выбрали высказывание Вилларда Баскома, которое подчеркивает необходимость всесторонней проверки мате-

матических моделей реальными наблюдениями в море. Мы, на наш взгляд, в данной работе следовали этому правилу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 11-05-01211-а.

Список литературы

- [1] *Здоровеннов Р. Э.* Приливной перенос примеси в прибрежных районах Белого моря // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2004. 24 с.
- [2] *Ионов В. В., Май Р. И., Смагин Р. Е.* Новые гармонические постоянные приливных колебаний уровня моря в губе Кереть Белого моря (по данным экспедиционных работ 2011 года) // Вестн. СПбГУ. 2013. Сер. 7, вып. 2. С. 94—107.
- [3] *Ионов В. В., Май Р. И., Смагин Р. Е.* Течения в проливах губы Кереть // Вестн. СПбГУ. 2015. (В печати).
- [4] *Клеванный К. А.* Моделирование длинноволновых процессов в геофизической гидродинамике // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 1999. 314 с.
- [5] *Май Р. И.* Нелинейные баротропные и бароклинные приливные явления в морях Европейской Арктики // Автореф дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2006. 20 с. URL: http://oceanographers.ru/books/Ruslan_May_avtoreferat.pdf.
- [6] *Май Р. И.* Нелинейные приливные явления Белого моря // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна / Под ред. Г. Г. Матишова. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2007. № 2. С. 185—200.
- [7] Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. Изд. 4-е перераб. и доп. Росгидромет, РД 52.04. 2011. 102 с.
- [8] *Некрасов А. В.* Энергия океанских приливов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 288 с.
- [9] *Примаков И. М., Морозов Е. А.* Моделирование гидродинамических процессов в некоторых губах Карельского берега Кандалакшского залива // Вестн. СПбГУ. 2006. Сер. 3. Вып. 4. С. 68—73.
- [10] *Примаков И. М.* Распространение планктонных организмов приливных губ Белого моря под влиянием гидродинамических условий // Тр. ЗИН РАН. 2008. Т. 312. № 1/2. С. 135—144.
- [11] *Примаков И. М., Клеванная М. К.* Зоопланктон — пассивная примесь или активный компонент пелагиали? // Материалы XI Науч. семинара. «Чтения памяти К. М. Дерюгина», СПб., 2009. С. 80—92.
- [12] *Примаков И. М., Раилкин А. И.* Особенности гидрологического режима в проливе Подпахта (Кандалакшский залив, Белое море) // Тез. докл. VII Науч. сессии Морской биологической станции Санкт-Петербургского государственного университета. СПб., 2006. С. 36—37.
- [13] *Раилкин А. И., Бесядовский А. Р., Примаков И. М., Колдунов А. В.* Взаимодействие прибрежных бентосных сообществ Белого моря с придонным слоем. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 408 с.
- [14] *Смагин Р. Е., Ионов В. В., Пряхина Г. В., Федорова И. В.* Исследование зон смешения в устьевой области р. Кереть Белого моря // Изв. РГО. 2009. Т. 141, вып. 2. С. 63—70.
- [15] *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dimensional coastal ocean models; N. S. Heaps, ed., Washington, DC, AGU, 1987. P. 1—15.
- [16] *Kimura N., Liu W.-C., Chiu C.-Y., Kratz T. K., Chen W.-B.* Real-time observation and prediction of physical processes in a typhoon-affected lake // Paddy Water Environ. 2012. Vol. 10. P. 17—30.

- [17] Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys.* 1982. Vol. 20. P. 851—875.
- [18] Oey L.-Y. A wetting and drying scheme for POM // *Ocean Modelling.* 2005. Vol. 9. P. 133—150.
- [19] Schimmelpfennig S., Kirillin G., Engelhardt C., Nutzmann G. Effects of wind-driven circulation on river intrusion in Lake Tegel: modeling study with projection on transport of pollutants // *Environ Fluid Mech.* 2012. Vol. 12. P. 321—339.

Поступило в редакцию
30 октября 2014 г.

Numeric hydrodynamic model of tidal phenomena in the Keret Bay (Kandalaksha Bay, White Sea)

© V. V. Ionov,¹ R. I. May,² R. E. Smagin³

Saint-Petersburg State University

E-mail: ¹ victor@vi3787.spb.edu

² rimay@mail.ru

³ rsmagin@yandex.ru

In the current paper the model of Keret Bay is described based on algorithms of famous numerical hydrodynamic model POM (Princeton Ocean Model). Numerical experiments with various types of the open boundary conditions show that the model skill score of small tidal basins is fully determined by open boundary conditions. The use of the tidal sea level oscillation at open boundary condition gives insufficient results. The best skill score is achieved by setting the radiation open boundary condition while using current and sea level data. In this case, a comparison of the model-based results and sea level and current measurements shows the best agreements: the correlation coefficient between the modeled sea level and the measurements is up to 1, and the correlation coefficient between the simulated and observed currents equals to 0.9. The root-mean-square error (RMSE) is 2 times smaller than permissible error, both for sea level and currents.

The analysis of the model results shows that sea level changing occurs at all area synchronically, but there is a several minutes time-lag between high water at Podpakhta Strait and Lebyazhya Bay and high water at Keret Bay. The parameters of the tidal ellipses of 16 constituents were calculated using the harmonic analysis. It was found that for a period of one month the maximal velocities of tidal currents (up to 80 cm/s) are noted in narrow and shallow parts of Podpakhta Strait. In the Keret Bay the maximal velocities of tidal currents exceed 30 cm/s at narrow places of Srednyaya Salma and Uzkaya Salma straits. Tidal currents have basically reverse character. The residual tidal phenomena were estimated by averaging the model results of sea level and currents. The residual tidal level almost completely coincides with the mean sea level. The field of residual tidal circulation contains cyclonic vortices in the Lebyazhya Bay, Podpakhta Strait and in central part of Keret Bay. Residual vortices in the Lebyazhya Bay and Podpakhta Strait have significant velocities and can form common circulation in those basins. For Keret Bay, the inter-tidal zones areas and their temporal variabilities are calculated by numerical model.

In the future, the described model can be used to discover distribution of river water, formation of thermohaline structures, to calculate pollution and plankton transits.

Key words: numerical hydrodynamic model, tidal currents, tidal sea level, residual tidal circulation, intertidal zones, White Sea, Keret Bay.

References

- [1] Zdorovenkov R. E'. Prilivnoj perenos primesi v pribrezhnyx rajonax Belogo morya // *Avtoreferat dis. ... kand. geogr. nauk.* Murmansk, 2004. 24 c.

- [2] *Ionov V. V., May R. I., Smagin R. E.* Novye garmonicheskie postoyannye prilivnyx kolebanij urovnya morya v gube Keret' Belogo morya (po dannym e'kspedicionnyx rabot 2011 goda) // Vestn. S-Peterburg. un-ta. 2013. Ser. 7, vyp. 2. C. 94—107.
- [3] *Ionov V. V., May R. I., Smagin R. E.* Teleniya v prolivax guby Keret' // Vestn. S-Peterburg. un-ta. 2015. (v pechati).
- [4] *Klevannyj K. A.* Modelirovanie dlinnovolnovyx processov v geofizicheskoj gidrodinamike // Dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk. SPb., 1999. 314 s.
- [5] *May R. I.* Nelinejnye barotropnye i baroklinnye prilivnye yavleniya v moryax Evropejskoj Arktiki // Avtoreferat dis. ... kand. geogr. nauk. SPb., 2006. 20 c. URL: http://oceanographers.ru/books/Ruslan_May_avtoreferat.pdf
- [6] *May R. I.* Nelinejnye prilivnye yavleniya Belogo morya // Kompleksnye issledovaniya processov, karakteristik i resursov rossijskix morej Severo-Evropejskogo bassejna / Pod red. G. G. Matishova. Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2007. № 2. S. 185—200.
- [7] Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3., Chast' III. Sluzhba morskix gidrologicheskix prognozov. Izdanie 4-e pererabotannoe i dopolnennoe. Rosgidromet, RD 52.04. 2011. 102 s.
- [8] *Nekrasov A. V.* E'nergiya okeanskix prilivov L.: Gidrometeoizdat, 1990. 288 s.
- [9] *Primakov I. M., Morozov E. A.* Modelirovanie gidrodinamicheskix processov v nekotoryx gubax Karel'skogo berega Kandalakshskogo zaliva // Vestn. S.-Peterburg. un-ta. 2006. Ser. 3. Vyp. 4. S. 68—73.
- [10] *Primakov I. M.* Rasprostranenie planktonnyx organizmov prilivnyx gub Belogo morya pod vliyaniem gidrodinamicheskix uslovij // Tr. ZIN RAN. 2008. T. 312, № 1/2. S. 135—144.
- [11] *Primakov I. M., Klevannaya M. K.* Zooplankton — passivnaya primes' ili aktivnyj komponent pelagiali? // Materialy XI nauchnogo seminaru «Chteniya pamyati K. M. Deryugina», SPb., 2009. S. 80—92.
- [12] *Primakov I. M., Railkin A. I.* Osobennosti gidrologicheskogo rezhima v prolive Podpaxta (Kandalakshskij zaliv, Beloe more) / Tez. dokl. VII nauchnoj sessii Morskoj biologicheskoj stancii Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta. SPb., 2006. S. 36—37.
- [13] *Railkin A. I., Besyadovskij A. R., Primakov I. M., Koldunov A. V.* Vzaimodejstvie pribrezhnyx bentosnyx soobshhestv Belogo morya s pridonnym sloem. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2012. 408 s.
- [14] *Smagin R. E., Ionov V. V., Pryaxina G. V., Fedorova I. V.* Issledovanie zon smesheniya v ust'evoj oblasti r. Keret' Belogo morya // Izv. RGO. 2009. T. 141, vyp. 2. S. 63—70.
- [15] *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model / Three-dimensional coastal ocean models; N. S. Heaps, ed., Washington, DC, AGU, 1987. 1—16.
- [16] *Kimura N., Liu W.-C., Chiu C.-Y., Kratz T. K., Chen W.-B.* Real-time observation and prediction of physical processes in a typhoon-affected lake // Paddy Water Environ. 2012. Vol. 10. P. 17—30.
- [17] *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. 1982. Vol. 20. P. 851—875.
- [18] *Oey L.-Y.* A wetting and drying scheme for POM // Ocean Modelling. 2005. Vol. 9. P. 133—150.
- [19] *Schimmelpfennig S., Kirillin G., Engelhardt C., Nutzmann G.* Effects of wind-driven circulation on river intrusion in Lake Tegel: modeling study with projection on transport of pollutants. // Environ Fluid Mech. 2012. Vol. 12. P. 321—339.