

## Литература

1. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. Учебное пособие. – Омск, Изд-во Омского СХИ, 1982. – 84 с.
2. Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса. Учебное пособие. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1973. – 80 с.
3. Копысов С.Г., Росновский И.Н. Гидрологические свойства почвы как результат взаимодействия климатических и ландшафтных условий // Современные проблемы генезиса, географии и картографии почв. Материалы V конференции с международным участием. – Томск: Томский госуниверситет, 2011. – С. 256-259.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АРАЛЬСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ 3D МОДЕЛИ

*В.Н. Кузин, Е.Н. Голубева*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, kuzin@sscc.ru*

## MODELING OF THE HYDROTHERMODYNAMICAL PROCESSES IN THE ARAL SEA ON THE BASE OF 3D MODEL

*V.I. Kuzin, E.N. Golubeva*

*Institute of Computational Mathematics & Mathematical Geophysics SB RAS*

*Следствием процессов, произошедших в Аральском море в результате использования вод Аму-Дарьи и Сыр-Дарьи для орошения, является следующее: после высыхания Аральское море потеряло больше 60 % площади и около 80 % объема. Соленость возросла с уровня 10 г/л до значений более 100 г/л. Биопродуктивность моря была полностью разрушена. Настоящая работа посвящена обсуждению результатов численного моделирования по возможным сценариям сохранения и реабилитации западной части Аральского моря проводимым в рамках проекта INTAS REBASOWS на основе трехмерной модели гидротермодинамики Аральского моря ИВМиМГ СО РАН.*

*The Consequence of the processes in the Aral Sea as the result of the use of the waters Amu-Darya and Syr-Darya rivers for irrigation are the follows: in as the result of desiccation the Aral Sea lost more then 60 % of the area and about 80 % per sent of it volume. Salinity increased from 10 g/l to 110 g/l. The bio-productivity of the sea was destroyed totally. Present work is devoted to the discussion of the results of the numerical simmlutions by the possible scenarios of the saving and rehabilitation of the Western part of the Aral Sea on the base of the 3D hydrothermodynamical Aral Sea ICM&MG SD RAS circulation model.*

С начала 1960 годов вследствие существенного сокращения речного притока уровень воды в Аральском море снизился примерно на 24 метра, площадь моря уменьшилась на 75 %, объем воды в нем – на 90%, а средняя соленость в разных частях водоема возросла с 10 до 90-160 г/л, что привело к вымиранию многих видов живых организмов и другим негативным экологическим последствиям.

В кооперации с сотрудниками Научно-информационного центра Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии (НИЦ МКБК) и Академии наук Узбекистана в рамках проекта ИНТАС-0511 (REBASOWS) была выполнена работа по изучению возможности восстановления экосистемы наиболее глубокой западной части Большого Арала. Для этого требуется воссоздать экологически приемлемые гидрохимические и гидрофизические условия в ней. Единственной возможностью решения такой задачи является прямая подача части остаточного стока р. Амударьи в этот водоем (его южную часть) с обеспечением его проточности для вымывания избытка солей.

Расчеты, выполненные с использованием специально разработанной трехмерной гидротермодинамической модели водоема, учитывающей плотностную стратификацию водной среды, дали возможность описать гидрологический, солевой и ледотермический режимы западной части Большого Арала. Расчеты показали, что при периодической подаче достаточно больших объемов речной воды к южной оконечности западной части Большого Арала можно осуществить опреснение вод рассматриваемой части моря с вымыванием солей транзитным течением и сбросом избытка воды по проливу, соединяющему западную и восточную части Большого Арала, в его восточную часть.

*Моделирование гидрофизических процессов Аральского моря по трехмерной гидродинамической модели.* В лаборатории математического моделирования гидросферы ИВМ и МГ (ВЦ) СО РАН разработана модель циркуляции Аральского моря, основанная на модификации численной модели циркуляции океана, являющейся базовой для проведения исследований в бассейне Мирового океана и окраинных морях [1-2].

*Общая характеристика модели.* Математическая модель основана на трехмерных полных нелинейных уравнениях динамики моря; температура и

соленость являются расчетными характеристиками; в модели имеется блок расчета распространения примеси; взаимодействие с атмосферой осуществляется через верхний квазиоднородный слой; модель учитывает возможность включения притоков и истоков на боковых границах; реализация модели основана на разделении баротропной и бароклинной составляющей движения; численная реализация модели основана на комбинации метода конечных элементов и метода расщепления по пространственным переменным; в модели используется триангулированная квазирегулярная В-сетка, позволяющая производить изменения конфигурации бассейна; используется версия модели в физических вертикальных координатах, так называемая z-координатная модель.

На границах притока задаются скорости, температура и соленость, на свободной поверхности – потоки тепла и влаги (из-за атмосферных осадков, испарения, ледообразования и снего-ледотаяния), рассчитанные по вертикальной одномерной модели для соответствующего сценария. Исходя из этого потока влаги, вычисляется поток соли на свободной поверхности. В данной версии трехмерной модели Аральского моря при формировании перемешанного слоя используется критерий «числа Ричардсона».

*Входные данные и представление результатов расчетов.* Входные данные модели следующие: на поверхности моря: напряжение трения ветра, рассчитываемое по значению ветра на уровне 2 м; потоки тепла и соли (влаги). На притоках через боковую границу: задается подача речной воды; температура и соленость подаваемой воды являются заданными. Начальное состояние: однородное распределение температуры и солености во всем бассейне. Результаты расчетов: трехмерные поля скорости, поля температуры и солености в сезонном цикле.

*Источники данных.* Среднемесячные климатические данные для расчета потоков тепла и соли; данные по расходу и солености подаваемой речной воды; среднемесячный климатический ветер (скорость и направление) для расчета напряжения трения ветра; данные реанализа NCEP/NCAR.

*Постановка численных экспериментов и анализ результатов.* Результаты моделирования по трехмерной модели, представленной в настоящей работе, можно трактовать как реализацию некоторых сценариев по изучению возможной реакции Аральского моря на варианты речного притока и атмосферного воздействия. В двух рассмотренных сценариях по моделированию циркуляции Аральского моря рассчитаны основные черты циркуляции, термодинамики и распределения солености.

Область Аральского моря для расчета трехмерных течений, термодинамических характеристик и распространения пресной воды построена на основе топографии дна. В численной модели использовалось

горизонтальная сетка с разрешением 500м\*500м и неравномерная вертикальная сетка (34 уровня для максимальной глубины).

Расчеты выполнены для двух сценариев. В первом сценарии [3-4] задавался начальный уровень воды 26 м (Балтийская система отсчета) и постоянная по пространству начальная соленость 140 г/л. Возможность стока воды не предусматривалась, т.к. в течение расчетного периода уровень воды в рассматриваемом водоеме был ниже уровня седловины порога между западной и восточной частями моря. Во втором сценарии задавался более высокий начальный уровень воды 29 м БС и постоянная по пространству начальная соленость 110 г/л. Соответственно, в этом случае учитывался сток воды в восточную часть моря через расположенный на севере пролив. В обоих случаях расчет начинался с 1 января. Подача воды Амударья на юг западной часть Большого Арала соответствовала сценарию с интенсивным паводком. В начальный момент времени температура воды считалась постоянной по водоему и равной  $-2,5^{\circ}\text{C}$ .

Интегрирование модели проводилось в течение полутора лет с напряжением трения ветра полученного из его климатических значений. На каждом шаге рассчитывались поля скорости, температуры и изменения солености как результат речного притока. В дальнейших разделах представлены результаты данного численного эксперимента и обсуждаются некоторые особенности циркуляции, термодинамики и распространения пресной воды. Поскольку входные параметры по воздействию атмосферы и притоку пресной воды для двух экспериментов были идентичны, то картины циркуляции и термического режима были одинаковыми, и мы будем их обсуждать как типичное состояние для двух сценариев.

Циркуляция в западной части Большого Арала является весьма изменчивой. Хотя доминирующие ее картины и не обнаружены, можно выделить некоторые характерные черты. Во-первых, циркуляция чувствительна к ветру и в поверхностных слоях в основном определяется ветром. Однако в глубинных слоях в летний сезон существует хорошо выраженная термохалинная циркуляция. Ее изменение при заданном ветре в течение периода интегрирования может быть описано следующим образом. Воздействие ветра в марте формирует на поверхности некоторый вариант циклонической экмановской циркуляции (рис. 1). Направленный на север поток является более интенсивным в восточной части бассейна, в то время как в западной части движение направлено на юг и существенно менее интенсивно. Значения скоростей достаточно малы и достигают 20 см/с. Сохранение массы воды в бассейне осуществляется за счет вертикальной циркуляции в глубокой его части. В летний сезон (июль) не существует достаточно выраженной циклонической циркуляции. В глубинных слоях развивается некоторая циркуляция, вызванная взаимодействием термохалинных сил с рельефом дна и береговой линией (на рисунках не представлено). Осенью экмановский перенос в Восточной части на поверхности моря направлен на северо-восток. Высокая соленость понижает

точку замерзания до уровня  $-6,5^{\circ}\text{C}$ . Потому в течение зимнего сезона ледовое покрытие возникает в период меньше одного месяца, и блокирование ветра льдом не существенно.

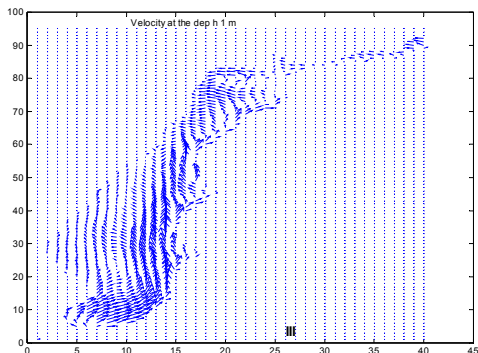


Рис. 1. Поле скорости на глубине 1 м: март, максимальная скорость – 20 см/с

Вариации термического режима в западной части Большого Арала находятся под влиянием сезонного температурного цикла. Результаты расчетов показывают, что термические условия в западной части делятся на два основных состояния: зимняя гомотермия и летняя стратификация. Начиная с однородной температуры в январе, проходя через период зимнего охлаждения в феврале, в марте в бассейне формируется стратификация, т.к. начинается прогрев верхних слоев. Летняя температура (июль) на поверхности достигает значения около  $23^{\circ}\text{C}$ , и стратификация по температуре составляет около  $10^{\circ}\text{C}$  с интенсивным термоклинном. Зимнее охлаждение вызывает плотностную конвекцию, которая приводит к гомотермии. Причем охлаждение происходит быстрее в мелководных зонах и медленнее в глубоких районах центральной части бассейна.

*Распределение солености и распространение пресной воды.* Начальное распределение солености для первого сценария сохранялось до мая, когда начался интенсивный приток речной воды. Пресная вода распространяется с юга на север до тех пор, пока интенсивная подача не прекращается. После этого в зимний сезон распределение солености становится однородным по вертикали вследствие плотностной конвекции со значением около 111 г/л, что меньше начального значения на 29 г/л. Линза пресной воды перемещается вблизи поверхности и управляется интенсивным течением вдоль восточного берега. Сечения вдоль меридиана от речного притока до берега подтверждают тот тезис, что пресная вода распространяется в поверхностном слое к северу и после зимней конвекции происходит ее равномерное распределение по вертикали. Поведение солености,

осредненной по всему бассейну, показывает, что стабилизация средней солености происходит в октябре, после того как прекращается интенсивный приток пресной воды.

Деминерализация бассейна во втором сценарии по сравнению с первым происходит другим образом. Сброс излишка соленой воды в восточную часть моря приводит к более интенсивному падению солености в течение расчетного периода. Значения солености на глубине 1 м представлены на рисунке 2. Видно, как фронт распресненной воды распространяется не на север, имея в некоторые периоды отклонения от зонального распределения, однако в финальный месяц расчетов приобретает зональное распределение со средним значением около 75 г/л. Меридиональные разрезы, характеризующие распространение вод ослабленной солености с юга на север от места притока представлены на рисунке 3. Из рисунков видно, что воды пониженной солености перемещаются в поверхностном слое моря, формируя ярко выраженный галоклин, который разрушается в период зимней конвекции, приводя к гомогенизации солености.

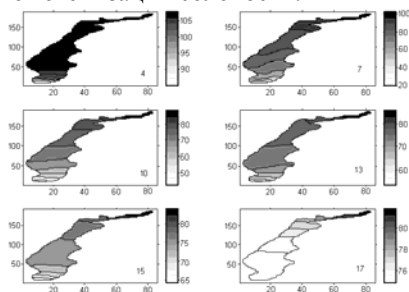


Рис. 2. Горизонтальное распределение солености на глубине 1 м (апрель, июль, октябрь, январь, март, май)

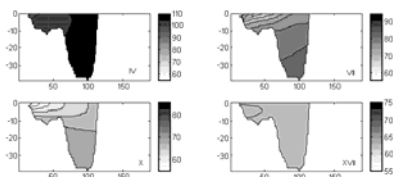


Рис. 3. Вертикальный разрез по меридиану от точки притока в западную часть (апрель, июль, октябрь, май)

Характерной особенностью этого численного эксперимента является более быстрое опреснение бассейна за счет сброса соленой воды через слив в северной части.

*Заключение.* На основе результатов расчетов двух сценариев можно сделать следующие выводы. Поверхностная циркуляция чувствительна к ветру и изменяется с изменением ветра. В летний сезон в глубинных слоях существует термохалинная циркуляция. Распределение температуры характеризуется двумя состояниями: наличием ярко выраженного термоклина летом и гомотермии – зимой, вызываемой конвекцией. Распространение пресной воды характеризуется следующими чертами: пресная вода распространяется с юга на север в поверхностном слое, управляемая основными течениями; однородное состояние солености

достигается только в зимний период посредством механизма температурной конвекции. Характерной особенностью численного эксперимента со сбросом соленой воды через северную часть бассейна в восточную часть Большого Аральского моря является более быстрое опреснение бассейна.

Таким образом, согласно выполненным расчетам, в случае подачи в западную часть Большого Арала достаточно большого объема пресной воды, превышающего величину эффективного испарения с его акватории, можно обеспечить вымыв солей из его западной части со сбросом излишка минерализованной воды в восточную часть.

### **Литература**

1. Голубева Е.Н., Иванов Ю.А., Кузин В.И., Платов Г.А. Численное моделирование Мирового океана с учетом верхнего перемешанного слоя // *Океанология*. – 1992. – Т. 32. – № 3. – С. 395-405.
2. Кузин В.И. Метод конечных элементов в моделировании океанических процессов. – Новосибирск: Изд. СО РАН, ВЦ СО РАН.
3. Kuzin V.I., Golubeva E.N. Modeling of hydrodynamic and hydrophysical processes in the Aral Sea // Труды междунар. конгр.«GEO-Siberia», 2005.
4. Kuzin V.I., Golubeva E.N. Modeling of hydrophysical processes in the Aral Sea // *Bull. NCC, Series of Num. Model. in Atmosph., Ocean, and Env. Studies*. – 2005. – Iss. 10.