

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АРАЛЬСКОГО МОРЯ**

**О.Ф. Васильев, Т.Э. Овчинникова, А.Н. Семчуков, С.И. Прокопьев,  
К.В. Иевлев, Е.А. Коробкина**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, 630090 Новосибирск,  
Морской просп., д.2*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В работе представлены результаты математического моделирования изменения уровня воды, солевого и термического режимов в западной части Аральского моря в случае, когда прекращается приток воды в нее из восточной части из-за понижения уровня в последней. Рассмотрен, в частности, процесс усыхания западной части моря при полном отсутствии притока воды к ней. Основные расчеты выполнены для двух групп сценариев, предложенных НИИ МКВК: так называемых 1-го и 2-го водохозяйственных вариантов. В первой группе сценариев расходы подачи воды из Амударьи во всех случаях таковы, что они позволяют лишь стабилизировать уровень и солевой режимы водоема при отметках уровня ниже отметки порога перевала между западной и восточной частями моря (на высоте примерно 29.3 м). Во второй группе сценариев (водохозяйственный вариант 2) объемы подачи воды из Амударьи значительно больше, что приводит к превышению уровня перевала и переливу воды из западной части Арала в восточную. При этом возникает возможность вымыва солей из западной части в результате возникновения транзитного течения с юга на север.

Работа выполнена в рамках проекта INTAS-01-0511. Сценарии были предложены коллективом НИЦ МКВК. Целями расчетов являлись: прогноз уровня, солевого и термического режимов западной части Аральского моря при различных сценариях, оценка длительности периода стабилизации этих режимов, и, главное, выявление возможности устойчивого снижения солености воды в водоеме до экологически приемлемого уровня. При осуществлении этого исследования был выполнен также анализ внутригодовой динамики вертикальных распределений солености и температуры.

### **ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Выбор метода моделирования гидродинамических и гидрофизических процессов в глубоких стратифицированных по плотности водоемах имеет большое значение для адекватного описания этих процессов и для эффективного решения поставленных задач. Применение сложных трехмерных моделей в этих случаях зачастую не является оптимальным, поскольку требует больших вычислительных затрат, а исходная информация об объекте страдает, как правило, неполнотой и неопределенностью. В то же время нередко наиболее важные характеристики изучаемых процессов можно выявить и с помощью более простых, приближенных, моделей, в частности — моделей меньшей размерности. Использование двумерных,

одномерных и объемных (нульмерных) моделей во многих случаях может быть достаточно эффективным даже в условиях сложной конфигурации водоемов.

Для расчета гидрофизических процессов в западной, наиболее глубокой, части Аральского моря нами были разработаны модели различной размерности. Объемная модель позволяет сравнительно просто, используя интегральные уравнения водного, солевого и теплового балансов, описать ход основных гидрологических процессов в водоеме и дать первичную оценку скорости изменения объема воды в нем и сопутствующего изменения средней по объему солености воды. Известная в физической лимнологии одномерная вертикальная модель позволяет описать вертикальные распределения солености, температуры, а отсюда и плотности водной среды, т. е. ее стратификацию. Модель построена путем осреднения трехмерных уравнений гидродинамики по горизонтальным сечениям водоема и включает блок моделирования турбулентного обмена на основе уравнений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации ( $\epsilon$ — $\epsilon$ —модель). В модели учитывается приток воды и ее отток из водоема, вертикальное положение зон притока и оттока, а также эффект селективного оттока при наличии стратификации.

Обе модели включают блок, описывающий тепло- и массообмен с атмосферой и динамику изменения толщины снежного и ледового покрова. В моделях используется международное уравнение состояния морской воды (Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана, 1987.) для описания зависимости плотности воды от температуры и солености. Учитывается также понижение температуры замерзания воды и интенсивности ее испарения в зависимости от солености.

## СЦЕНАРИИ РАСЧЕТОВ

Сценарии расчета изменения уровня воды и солености в западной части Аральского моря определяются сценариями подачи воды Амударьи. Было задано 12 сценариев расчета: для каждого из двух водохозяйственных вариантов, предусматривающих подачу вод Амударьи в западную часть моря (водохозяйственный вариант 1 – инфраструктура дельты в соответствии с проектом NATO SFP 974357, водохозяйственный вариант 2 – т.н. гипотетический вариант подачи воды в западную часть моря) имеется три сценария стока Амударьи (национальное видение, сохранение существующих тенденций, оптимистичный сценарий), а для каждого сценария стока имеется минимальная и максимальная оценка. Кроме того, рассматривается случай полного отсутствия поступления воды в водоем, что соответствует существующей инфраструктуре дельты Амударьи. Для каждого сценария задавалась и минерализация притока.

Средний годовой сток в этих сценариях изменялся от 1.7 км<sup>3</sup> в наименее благоприятном варианте до 9.94 км<sup>3</sup> в самом оптимистичном. Под годовым стоком здесь понимается суммарное поступление воды Амударьи в водоем за гидрологический год, который в данном случае начинается 1 октября. В качестве метеоданных использовались климатические (среднегодовые) данные с усреднением метеопараметров по месяцам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ расчетов по двум моделям показал, что в первом водохозяйственном варианте в оптимистическом сценарии и в сценарии "сохранения существующих тенденций" можно ожидать относительной стабилизации уровня западной части моря. Сценарий "национальное видение" в расчетах по объемной модели к стабилизации не приводил, а по одномерной модели в этом сценарии наблюдалась относительная стабилизация при максимальной оценке стока. Согласно расчету по объемной модели, при отсутствии притока уровень воды падает равномерно с точностью до годовых колебаний и к концу расчетного 15 летнего периода опускается до 15.77 м.

Во втором водохозяйственном варианте при всех сценариях наблюдался подъем уровня с переходом за критическую отметку 29.3 м. Поэтому для этого случая расчеты по одномерной модели учитывали переток воды в восточную часть. Расчеты показали, что при разных начальных значениях уровня (26, 27, 28 и 29 м) подъем уровня продолжается до критической отметки, а затем он колеблется вблизи 29.5 м. Таким образом, наблюдается его относительная стабилизация.

В табл. 1 приведены значения уровня воды на конец расчетного периода для первого водохозяйственного варианта, полученные по двум моделям.

Таблица 1. Значения уровня на конец расчетного периода, м

Модель	Нац. видение Мин	Нац. видение макс	Сохр. тенд. мин	Сохр. тенд. макс	Оптимист. сцен. мин	Оптимист. сцен. макс
Объемная	23.1	23.4	24.5	24.6	25.9	27.0
Одномерная	26.2	27.2	27.4	28.5	28.9	30.0

Изменение солёности вод моря обусловлено двумя факторами: эффективным испарением и поступлением более пресных вод притока. При отсутствии притока, как показали расчеты по объемной модели, средняя солёность вод моря к концу пятнадцатилетнего периода поднимается до 279.88 г/л.

В расчетах по всем 12 вариантам основной вклад в изменение солёности вод моря вносят более пресные воды притока. Динамика изменения средней солёности полностью соответствует ходу уровня: при его повышении солёность падает, а при понижении растет.

Для первого водохозяйственного варианта по объемной и одномерной моделям здесь, как и в уровневом режиме, наблюдаются расхождения, в некоторых случаях превышающие 30 г/л. В табл. 2 приводятся значения солёности на конец расчетного периода.

Таблица 2. Значения средней солености на конец расчетного периода, г/л

Модель	Нац. видение мин	Нац. видение макс	Сохран. тенд. мин	Сохран. тенд. макс	Оптимист. сцен. мин	Оптимист. сцен. макс
Объемная	170.3	167.1	154.2	153.1	139.5	128.8
Одномерная	131.0	121.0	120.8	114.0	110.5	102.4

Внутригодовая динамика вертикальных распределений солености, полученная по одномерной модели, показала, что с начала ноября и до начала апреля в водоеме наблюдается состояние гомохалинности, причем значение солености медленно понижается. С начала апреля и до начала июля в приповерхностных водах присутствует линза более пресной воды, которая к началу августа размывается, т. е. продолжительность ее существования составляет приблизительно 3 месяца. После этого устанавливается распределение с более высоким уровнем солености у поверхности, поскольку расходы притока падают, а процесс испарения продолжается. Максимальные различия между концентрациями соли у поверхности и дна достигаются в апреле и составляют около 2 г/л.

Основным фактором формирования температуры воды в водоеме являются метеоусловия, описывающие сезонную изменчивость по среднегодовым климатическим данным. При этом характер поведения температуры воды в водоеме во всех расчетах был приблизительно одинаков. На процессы формирования льда существенно влияет снижение температуры замерзания из-за увеличения солености воды.

Сезонное изменение температуры воды является очень важным для условий обитания гидробионтов. На основе расчетов по одномерной вертикальной модели было установлено, что с декабря по март (т. е. около пяти месяцев в году) в водоеме наблюдается состояние гомотермии с температурой примерно от +2° С (в начале декабря) до -7° С (в начале марта). К началу апреля верхние слои воды уже начинают прогреваться, в то время как нижние все еще имеют температуру около -7° С.

В период апрель—август происходит прогревание верхних слоев воды, к началу августа их температура достигает около 24° С, а затем начинается постепенное охлаждение. За счет перемешивания более теплые воды проникают и в придонные слои, но там прогрев осуществляется гораздо медленнее. К началу сентября температура у дна все еще отрицательная (около -1° С), а разница с поверхностной температурой составляет примерно 21° С.

Хотя в августе уже начинается постепенное охлаждение верхних слоев воды, нижние продолжают прогреваться за счет перемешивания с более теплыми верхними слоями. Во второй декаде ноября, и устанавливается режим гомотермии. В это время придонная температура достигает своего максимума (около 7° С). Таким образом, диапазон изменения придонной температуры приблизительно равен 14° С (в

интервале  $[-7, +7]^{\circ}\text{C}$ ), а у поверхности этот интервал составляет около  $30^{\circ}\text{C}$  (в интервале  $[-7, +23]^{\circ}\text{C}$ ).

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Численное моделирование показало, что в случае осуществления 1-го водохозяйственного варианта в 15-летней перспективе от начала подачи воды в западную часть моря согласно сценариям стока Амударьи "оптимистический" и "сохранение существующих тенденций" в рассматриваемом водоеме ожидается относительная стабилизация уровня воды на отметках от 24.5 до 30 м б/с со стабилизацией солености на уровне от 100 до 155 г/л. Для сценария стока "национальное видение" наиболее вероятно продолжение падения уровня и возрастание солености.

При реализации 2-го водохозяйственного варианта с большими, чем в первом, объемами подачи воды, ее уровень в западной части будет близок к отметке гребня перевала (около 29.5 м) между западной и восточной частями моря. Уже через несколько лет после начала подачи воды возможно существенное снижение солености. При больших объемах подачи воды можно ожидать значительного ее снижения, в этой связи – увеличение зимних температур воды и, в результате, достижение практически оптимальных экологических условий в водоеме. В докладе предполагается подробнее осветить этот вопрос.