

005553613

На правах рукописи

Ижицкий Александр Сергеевич

**ТЕРМОХАЛИННАЯ СТРУКТУРА И ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД
БОЛЬШОГО АРАЛЬСКОГО МОРЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

23 ОКТ 2014

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: доктор географических наук
Завьялов Петр Олегович

Официальные оппоненты: **Зонн Игорь Сергеевич,**
доктор географических наук,
«Инженерный научно-производственный
Центр по водному хозяйству, мелиорации и
экологии «СОЮЗВОДПРОЕКТ»», закрытое
акционерное общество,
генеральный директор

Станичный Сергей Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Морской гидрофизический институт
(г. Севастополь),
заведующий Отделом дистанционных методов
исследований

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук

Защита состоится «25» ноября 2014 года в 14 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д.002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36. 21

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/dissert/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «13» октября 2014 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

кандидат физико-математических наук  Гинзбург Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. К середине XX столетия Аральское море занимало четвертое место по площади среди крупнейших озер земного шара, уступая лишь Каспийскому морю и озерам Верхнее и Виктория. Однако начиная с 1960 г. уровень Аральского моря начал катастрофически снижаться, главным образом, в связи с интенсивным отбором стока питающих море рек Амударья и Сырдарья на нужды ирригации. В сравнении с «условно-естественным» состоянием моря, уровень его к настоящему времени понизился более чем на 27 м, в результате чего море потеряло более 90% объема своих вод. Высыхание Аральского моря привело к глубоким изменениям его экосистемы, развитию процессов опустынивания на окружающей территории, а также значительным негативным социально-экономическим последствиям для региона в целом.

Проблема Аральского моря вызывает постоянный интерес мирового научного сообщества. Изучение современного состояния Арала имеет как прикладное, так и фундаментальное научное значение. С одной стороны, состояние Аральского моря оказывает решающее воздействие на природные особенности окружающих территорий, социально-экономические условия в регионе, здоровье местного населения и структуру хозяйства. С другой стороны, значение экологического кризиса Аральского моря не ограничивается только региональными и прикладными аспектами. Современный Арал представляет собой своего рода «природную лабораторию», в которой может изучаться отклик физических, химических и биологических систем крупного внутреннего водоема аридной зоны на экстремальное антропогенное вмешательство. Результаты наблюдений и исследований в данной области могут быть применены, в том числе, для предотвращения возникновения и смягчения последствий подобных экологических кризисов в других районах земного шара.

На протяжении большей части XX столетия Аральское море было одним из наиболее хорошо изученных морей СССР. В этот период проводились систематические наблюдения за физическим, химическим и биологическим

состоянием моря. Регулярно выполнялись научные рейсы исследовательских судов, непрерывные гидрометеорологические измерения велись на прибрежных и островных метеостанциях, проводились авиаразведки ледового режима и другие наблюдения. На основе этих исследований были опубликованы сотни статей и ряд книг, некоторые из которых остаются «настольными» и для современных специалистов по Аральскому морю. К сожалению, натурные научные исследования на Аральском море были почти полностью прекращены в начале 1990-х гг. К тому времени практически прекратилось судоходство на Арале, а береговая линия высыхающего водоема ушла далеко от населенных пунктов, дорог и всей инфраструктуры. По этой причине выполнение исследовательских экспедиционных работ стало встречаться со значительными организационными и техническими затруднениями. Как следствие, к началу нового тысячелетия многие характеристики физических, химических и биологических систем быстро меняющегося моря оказались мало изученными, а некоторые – практически неизвестными научному сообществу. С одной стороны, именно к этому времени экологический кризис Аральского моря приобрел всемирную известность в качестве своего рода символа антропогенной угрозы окружающей среде, интерес к которому со стороны средств массовой информации постоянно возрастал. С другой стороны, уровень точных знаний о фактическом состоянии моря был (а в целом ряде отношений и остается ныне) совершенно недостаточным.

Общей целью данной диссертационной работы являлось изучение современного гидрофизического состояния Большого Аральского моря. Согласно обозначенной цели, в процессе подготовки диссертационной работы решались следующие задачи:

- 1) описание пространственной структуры термохалинных полей современного Большого Аральского моря и установление формирующих ее факторов;
- 2) исследование циркуляции Большого Аральского моря в его современном состоянии;

3) выявление физических механизмов, определяющих особенности циркуляции современного Аральского моря.

Научную новизну исследования составляют основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что высыхание Аральского моря привело к формированию повышенной вертикальной стратификации, определяющую роль в формировании которой в рассмотренный период времени (2009–2013 гг.) играл водообмен между отдельными бассейнами водоема. Роль этого водообмена, однако, снижалась по мере пересыхания восточного бассейна моря.

2. На основе натурных измерений и численного моделирования показано, что, несмотря на значительные изменения объема вод, термохалинных характеристик, морфологии и донного рельефа бассейна, общая циркуляция вод Аральского моря сохраняет свои основные особенности, отмечавшиеся в условно-естественном состоянии моря: антициклонический характер в поверхностном слое, циклонический – в придонном.

3. На основе численных экспериментов показано, что антициклонический характер поверхностной циркуляции вод современного Аральского моря связан с асимметрией зонального распределения глубин в рельефе дна в условиях преобладания северных ветров.

Достоверность научных результатов и выводов работы обеспечивается проведением подробного анализа данных контактных измерений в совокупности с использованием численных экспериментов. Натурные наблюдения в период с 2009 по 2013 гг. ежегодно проводились с использованием специально разработанной методики. Данные контактных измерений были получены с помощью современных приборов (CTD-зонды SBE, измерители течения Nortek AquaDopp, SeaHorse и др.), широко используемых в мире. Кроме того, результаты численного моделирования циркуляции вод Аральского моря обнаруживают хорошее соответствие данным контактных наблюдений.

Научное и практическое значение исследования определяется достигнутым прогрессом в понимании процессов развития гидрофизического состояния Большого Аральского моря в условиях глубокого экологического кризиса. Результаты исследования могут иметь важное значение при оценке влияния, оказываемого современным состоянием моря на природные особенности окружающих территорий, социально-экономические условия в регионе, здоровье местного населения. Помимо этого, полученные в ходе исследования выводы могут быть использованы при изучении отклика физических, химических и биологических систем крупных внутренних водоемов на антропогенное вмешательство и в других районах земного шара.

Необходимо отметить, что работа посвящена Большому Аральскому морю (и главным образом – его западному бассейну) и почти не касается проблем Малого моря. Это связано как с тем, что натурные исследования с участием автора в силу разных причин были ограничены Большим Аралом, так и с тем, что после отчленения бассейнов друг от друга Малое море превратилось в отдельный водоем с совершенно особым гидрологическим режимом, обсуждать который следует отдельно.

Личный вклад автора определяется тем, что он:

1. участвовал в работе 5 научно-исследовательских экспедиций в Аральском море в период с 2009 по 2013 гг., в ходе которых были получены натурные данные, использованные в диссертационной работе;
2. выполнил обработку и анализ данных контактных наблюдений за период исследований;
3. участвовал в подготовке и проведении численных экспериментов по исследованию механизмов формирования циркуляции вод в Аральском море на основе трехмерной гидродинамической модели, предложил интерпретацию их результатов;

4. обеспечил подготовку полученных результатов к опубликованию в ведущих российских и зарубежных журналах, а также представлял их на российских и международных конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертации докладывались в порядке **апробации диссертационной работы** на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (2012, 2013, 2014 гг.), международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в ИКИ РАН (2010 г.), научном семинаре Лаборатории физики окружающей среды Университета Жироны, Испания (2012 г.), коллоквиуме исследовательской группы в Университете штата Аризона, США (2012 г.), ежегодных ассамблеях Европейского геофизического общества в Вене, Австрия (2010, 2011, 2012, 2014 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 1 коллективная монография, 5 тезисов докладов на конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка использованных источников. Объем работы составляет 112 страниц. Текст исследования иллюстрирован 61 рисунком и 4 таблицами. Библиографический список включает в себя 170 наименований, в том числе 56 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, основную цель исследования, поставленные задачи, научную новизну работы, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, практическую значимость, личный вклад автора, апробацию результатов исследования.

Глава 1 имеет вводный характер. В **разделе 1.1.** приводятся общие сведения относительно ряда чередующихся трансгрессий и регрессий

Аральского моря, имевших место в отдаленном прошлом. Палеоизменчивость Аральского моря была вызвана естественными изменениями климата, однако некоторые исследователи полагают, что изменения уровня в исторический период были частично антропогенными, принимая во внимание возможные последствия разрушения ирригационных систем в ходе войн и восстаний. В **разделе 1.2** на основании обширного литературного обзора описана история исследований, проводившихся на Аральском море в период с начала XVIII до конца XX вв., подробно освещено развитие научных представлений о различных особенностях водоема. В **разделе 1.3** дается обобщенная характеристика физического состояния Аральского моря к началу 1960-х гг. Состояние моря в данный период, соответствующее значению уровня поверхности Арала 53,0 м, служит своего рода точкой отсчета для оценки последующих изменений его режима. На основе анализа более ранних публикаций по теме диссертационного исследования выделены основные особенности физико-географических условий водоема, его гидрологической структуры и циркуляции вод. **Раздел 1.4** посвящен обзору современного состояния научных исследований на Аральском море.

В **Главе 2** приводятся результаты исследования термохалинной структуры Аральского моря на основе данных натурных наблюдений, в **разделе 2.1** дается информация о методике измерений. В диссертации рассматриваются результаты 5 экспедиций, проведенных в августе 2009 г. («Арал-11»), сентябре 2010 г. («Арал-12»), ноябре 2011 г. («Арал-13»), сентябре 2012 г. («Арал-14»), а также экспедиции «Арал-15», осуществленной в конце октября – начале ноября 2013 г. Район исследований находился в центральной, наиболее глубокой части западного бассейна Большого Аральского моря, севернее мыса Актумсук в районе одноименной метеостанции Узгидромета (рис. 1а). В каждой из экспедиций на гидрологических станциях проводилось STD-зондирование (электропроводность, температура, глубина) водной колонны с помощью океанографических зондов SBE, опускаемых с борта надувных лодок на ручной

лебедке. CTD-станции располагались на разрезе (рис. 1б), проведенном по нормали к западному берегу через наиболее глубокий участок бассейна. Длина разреза колебалась от 15,9 до 18,9 км, максимальная глубина составляла около 38 м. Кроме того, в каждой из экспедиций проводился отбор проб морской воды. Результаты последующего лабораторного анализа их минерализации методом сухого остатка использовались для корректировки измерений солености океанографическим зондом.

В общей сложности, в диссертационной работе рассмотрены данные CTD-измерений, полученные на 30 станциях в период с 2009 по 2013 гг., результаты их обработки и анализа приведены в **разделе 2.2.**

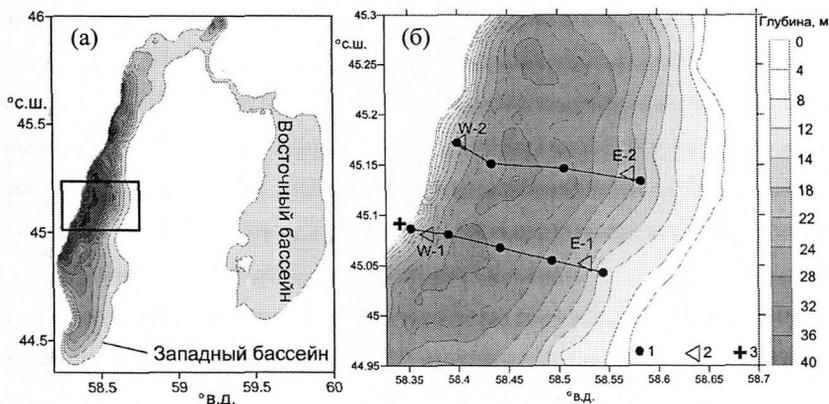


Рисунок. 1. Район исследования (а) и места расположения (б): 1 – CTD-станций, 2 – заякоренных станций, 3 – метеостанции. Пример схемы экспедиционных работ, выполненных в 2013 г.

Термохалинная структура вод западного бассейна Большого Аральского моря, наблюдаемая в каждой из экспедиций за исследуемый период, характеризовалась «трехслойной» структурой распределения величин солености и температуры, что хорошо описывается T,S -кривыми, построенными по данным наблюдений (рис. 2а). Наиболее теплые воды в каждой из съемок относятся к верхнему перемешанному слою. Тип вод с наименьшими значениями температуры и солености, выделяющийся на каждой

из кривых, относится к промежуточному, менее соленому слою толщи западного бассейна. Отметим, что год от года в этом слое, как и в верхнем перемешанном, происходит рост значений солености. За период с 2009 по 2012 гг. рост солености здесь составил приблизительно 10 г/кг. Третий слой – придонный, он характеризуется наличием максимальных значений солености и некоторым повышением температуры ко дну относительно промежуточного слоя. В противоположность верхнему слою, в придонном слое в период наблюдений происходило снижение величин солености (за исключением 2009–2010 гг.).

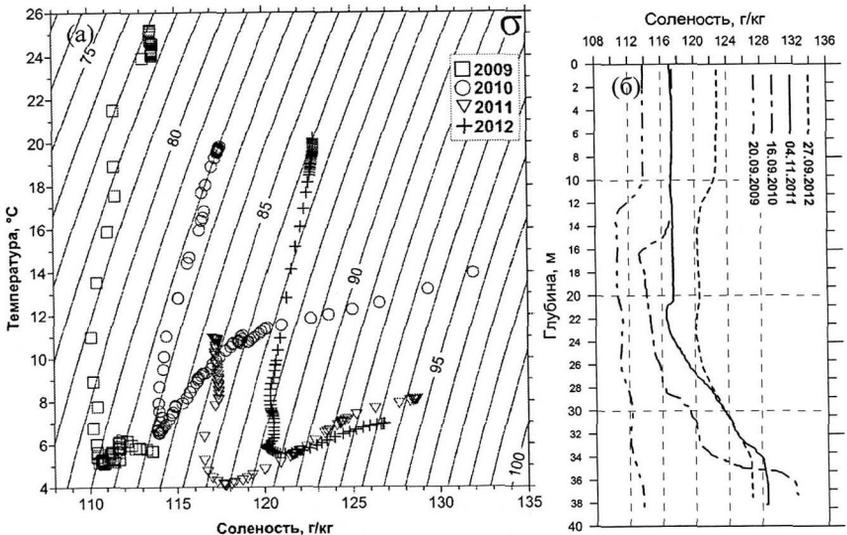


Рисунок. 2. T,S -кривые вод западного бассейна Большого Аральского моря в поле плотности (а) и вертикальные распределения солености (б) в период с 2009 по 2012 гг.

Межгодовая изменчивость вертикальных профилей солености (рис. 2б) в придонном слое определяется в значительной степени интенсивностью адвективного механизма формирования локального максимума солености у дна, связанного с поступлением более соленых и плотных вод из восточного бассейна моря. Для количественной характеристики динамики его

интенсивности можно использовать следующие величины: ΔS – разность величин солености у дна и на нижней границе промежуточного слоя, ΔT – разность соответствующих величин температуры. Значения этих величин для каждого года, а также их произведения на коэффициенты теплового расширения и соленостного сжатия, характеризующие их влияние на плотность, приведены в Таблице 1. Заметим, что начиная с 2010 г. происходит снижение значений как разности соленостей, так и выраженности температурной инверсии. Данное наблюдение может указывать на происходящее снижение роли адвективного механизма формирования придонного максимума солености, вызванное, очевидно, уменьшением объемов межбассейнового водообмена в связи с высыханием восточного бассейна. По-видимому, в ближайшем будущем следует ожидать дальнейшего выравнивания значений солености в поверхностном и придонном слоях, что, в конечном счете, должно привести к наступлению полного перемешивания водной колонны в ходе зимней конвекции и установлению нового типа термохалинной стратификации в бассейне. В разделе 2.3 даны выводы по второй главе.

Таблица 1. Изменчивость характеристик стратификации в придонном слое западного бассейна в период с 2009 по 2012 гг.

	2009	2010	2011	2012
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1,1	6,1	4,0	1,6
$\Delta S, \text{г/кг}$	3,5	18,6	12,8	6,9
$\alpha \Delta T 10^{-4}$	1,85	18,48	10,12	2,75
$\beta \Delta S 10^{-4}$	21,6	110,67	68,99	44,85

В Главе 3 рассмотрены особенности циркуляции вод Большого Аральского моря на основе результатов натурных наблюдений. В разделе 3.1 описаны использованные данные и методические подходы к их получению. Для исследования характера циркуляции вод в современном Аральском море была использована методика постановки заякоренных станций, оснащенных

измерителями скорости и направления течений, давления и другими приборами. Постановка станций в экспедициях с 2009 по 2013 гг. проводилась в наиболее глубоком участке западного бассейна Большого Аральского моря (рис. 1а). Как правило, станции располагались на восточном и западном склонах бассейна на глубинах 22–25 м (рис. 1б). Измерительные приборы на заякоренных станциях фиксировались как в придонном, так и в поверхностном слоях водной колонны. В диссертационной работе рассматриваются временные ряды непрерывных наблюдений за изменчивостью скорости и направления течений и уровня морской поверхности общей длительностью 480 часов; дискретность полученных данных – 10 минут. Вместе с измерениями течений проводились непрерывные измерения основных метеорологических параметров, данные о ходе которых были получены на автоматической портативной метеорологической станции, устанавливаемой на западном берегу бассейна непосредственно над урезом воды.

Раздел 3.2 посвящен описанию характера циркуляции вод в западном бассейне Большого Аральского моря и ее отклика на ветровое воздействие по результатам натурных данных. Относительно короткая длительность серий измерений, полученных в каждой из экспедиций, и их ограниченный пространственный охват не позволяют сделать исчерпывающих выводов относительно общей циркуляции современного Аральского моря. Однако эти наблюдения все же дают возможность проследить за откликом течений на синоптические ветровые воздействия.

Условия ветрового форсинга во время большей части наблюдений были близки к климатическим показателям, характерным для региона Аральского моря. В основном в период наблюдений отмечались ветры северных румбов, преимущественно северо-восточные. Именно северо-восточному ветру присуща наибольшая повторяемость в районе исследований, как по нашим данным, так и по климатическим. Однако в каждой из экспедиций наблюдались заметные отличительные особенности условий ветрового воздействия. Так,

условия наблюдений сентября 2010 г. можно отнести к «климатическому» типу с практически полным преобладанием северного ветра и наличием отдельных событий его усиления (рис. 3а). Поверхностные течения над западным склоном бассейна в этот период были направлены на север, северо-запад (скорости до 40 см/с, рис. 3в), над восточным склоном – на юг (скорости до 28 см/с, рис. 3д). Придонные течения вдоль западного склона на всем протяжении измерений направлены а юг (скорости до 17 см/с, рис. 3г), вдоль восточного склона – преимущественно на север (скорости до 15 см/с, рис. 3е). Таким образом, измерения 2010 г. указывают на наличие антициклонического круговорота в приповерхностном слое и циклонического – в придонном слое. Измерения 2013 г. дают редкую возможность проследить за тем, что происходит в противоположной ситуации, после события южного ветра. В этом случае во время ветрового воздействия и после него в поверхностном слое у западного берега сформировалось течение, направленное на юг (против ветра), что может указывать на организацию в этих условиях циклонической циркуляции вод в поверхностном слое, т.е. вызывать отклик, обратный «среднеклиматическому».

На основе анализа корреляционных связей между компонентами напряжения трения ветра, скорости придонного и приповерхностного течений, а также аномалиями уровня моря у западного и восточного склонов бассейна были выявлены механизмы формирования циркуляции вод моря в результате ветрового воздействия для преобладающих ветров северных румбов. Наиболее показательны в этом отношении измерения в условиях 2010 г., близких к климатической ситуации, вообще характерной для Аральского моря.

Согласно полученным результатам, под воздействием ветров северных румбов развиваются направленные на юг вдольбереговые поверхностные течения, приобретающие большую интенсивность на восточном мелководье. Об этом свидетельствует обнаруженная положительная корреляционная связь между меридиональными компонентами напряжения трения ветра и поверхностных течений вдоль западного и восточного берегов бассейна (рис.

Зж, з). Очевидно, что передача импульса толще воды за счет напряжения трения ветра должна приводить к более быстрому и энергичному развитию течений на мелководных участках бассейна, поскольку там импульс распределяется на меньшую массу. По-видимому, вместе с развитием течений уровень моря в южной части бассейна начинает расти, формируется его наклон вдоль продольной оси бассейна. В связи с этим, вдоль западного берега происходит формирование поверхностного течения, направленного на север (т.е. против ветра), на что указывает переход с течением времени положительной связи между меридиональными компонентами напряжения трения ветра и поверхностного течения над западным склоном в отрицательную (рис. 3з). Были выявлены также значимые антикорреляционные связи между меридиональными компонентами течений в восточной и западной частях бассейна – как для придонных (рис. 3л), так и для поверхностных течений (рис. 3к). Это наглядно иллюстрирует развитие крупномасштабных вихрей в поверхностном и придонном слоях бассейна. Установленный по результатам измерений 2010 г. характер корреляционных связей указывает на то, что действие прямого ветрового сгона является главенствующим механизмом, участвующим в развитии поверхностных течений. Результаты расчетов по данным 2009 и 2013 гг. выявляют также развитие в западном бассейне поверхностных течений экмановской природы и баротропно-эквивалентных течений, связанных с поперечным наклоном поверхности моря.

Хорошо известно, что средняя циркуляция в поверхностном слое Аральского моря в условно-естественный период имела антициклонический характер. Современная циркуляция высыхающего Аральского моря остается изученной недостаточно, однако полученные данные прямых измерений дают основание с высокой степенью уверенности утверждать, что в современном Аральском море под действием господствующих ветров сохраняется антициклонический характер циркуляции приповерхностных вод и циклонический – придонных. В разделе 3.3 даны выводы по третьей главе.

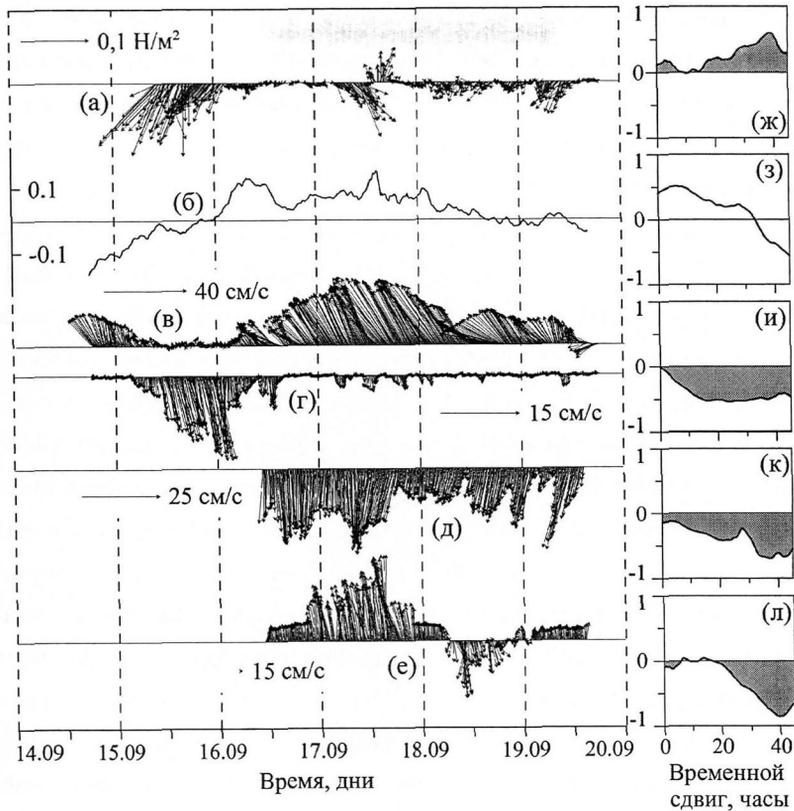


Рисунок 3. Данные измерений заякоренных станций и метеостанции в сентябре 2010 г.: векторная диаграмма для напряжения трения ветра (а), график колебания аномалии уровня моря над западным склоном бассейна (б), векторная диаграмма для поверхностных течений над западным склоном (в), придонных течений у западного склона (г), поверхностных течений над восточным склоном (д), придонных течений у восточного склона (е). Значения коэффициента корреляции в зависимости от временного сдвига между: меридиональными компонентами напряжения трения ветра и поверхностных течений над восточным склоном бассейна (ж), меридиональными компонентами напряжения трения ветра и поверхностных течений над западным склоном (з), меридиональной компонентой поверхностных течений над восточным склоном и аномалией уровня моря над западным склоном (и), меридиональными компонентами поверхностных течений над восточным и западным склонами (к), меридиональными компонентами придонных течений у восточного и западного склонов (л).

Глава 4 посвящена результатам численных экспериментов, целью которых являлось установление причин возникновения «необычной» (по сравнению с соседними морями – Черным, Азовским, Каспийском) антициклонической циркуляции вод в поверхностном слое моря под воздействием преобладающих северо-восточных ветров.

В **разделе 4.1** дано описание методики проведения численных экспериментов с использованием Принстонской модели океанической циркуляции, адаптированной к современным условиям западного бассейна Большого Аральского моря. Область моделирования охватывала весь западный бассейн, моделирование проводилось на сетке с 211 узлами вдоль направления север – юг с разрешением 967,02 м и 173 узлами вдоль направления восток-запад с разрешением 538,67 м. По вертикали использовались 17 равноудаленных сигма-уровней. Продолжительность каждого из выполненных модельных экспериментов составила 12 дней. Представленные ниже результаты были получены осреднением значений в промежутке между началом 9 и концом 12 дней моделирования. Фактором форсинга в рассматриваемых сценариях служил постоянный по времени и однородный по пространству северо-восточный ветер, являющийся доминирующим в течение года в данном регионе по данным многолетних метеорологических наблюдений. Напряжение трения ветра и донное трение рассчитывались по стандартным формулам, при этом коэффициент донного трения рассчитывался исходя из того, чтобы скорости на ближайших ко дну узлах обеспечивали выполнение логарифмического закона у стенки. Коэффициент шероховатости дна был выбран постоянным и равным 0,01 м. В качестве граничного условия на дне было принято условие «непротекания». Кроме того, в модельных экспериментах были заданы нулевые потоки тепла на всех границах.

Одним из основных факторов, определявших характер циркуляции вод в Аральском море до начала его высыхания, являлся рельеф дна. Еще А.И. Симонов (1954) выдвинул предположение о том, что асимметрия

распределения глубин в бассейне может являться одной из причин установления антициклонической циркуляции в поверхностном слое моря. В то время, однако, проверить эту гипотезу в прямых численных экспериментах не было возможности.

Несмотря на огромные морфометрические изменения, сопровождавшие высыхание моря, современное распределение глубин в море сохранило характерную черту, отмечавшуюся и до начала высыхания – а именно крутой западный склон бассейна и сравнительно пологий восточный склон. В нашей работе с целью подтвердить или опровергнуть выдвинутое ранее предположение для условий современного Арала были проведены модельные эксперименты с использованием реального (рис. 4а), а также искусственно «инвертированного» рельефа дна (рис. 4б). Разворот глубин производился по всем широтным линиям сетки моделирования за исключением мелководной северной части бассейна.

В разделе 4.2 описаны результаты численных экспериментов. Показано, что в современных морфологических условиях Аральского моря при воздействии климатического северо-восточного ветра в поверхностном слое бассейна формируется антициклонический характер циркуляции вод (рис 5а). Отметим совпадение этого факта с приведенными выше результатами прямых наблюдений. Использование в экспериментах «инвертированного» относительно продольной оси бассейна рельефа дна немедленно привело к изменению знака циркуляции вод на противоположный, т.е. формированию циклонической завихренности в поверхностном слое бассейна (рис. 5б). Аналогичные результаты были получены как для условий реальной стратификации водной толщи, так и отсутствия стратификации. Это позволяет заключить, что, несмотря на значительно сократившиеся размеры моря и глубокие изменения его гидрофизических характеристик, особенности донного рельефа бассейна продолжают являться основным фактором, определяющим «нетипичный» характер поверхностной циркуляции Аральского моря.

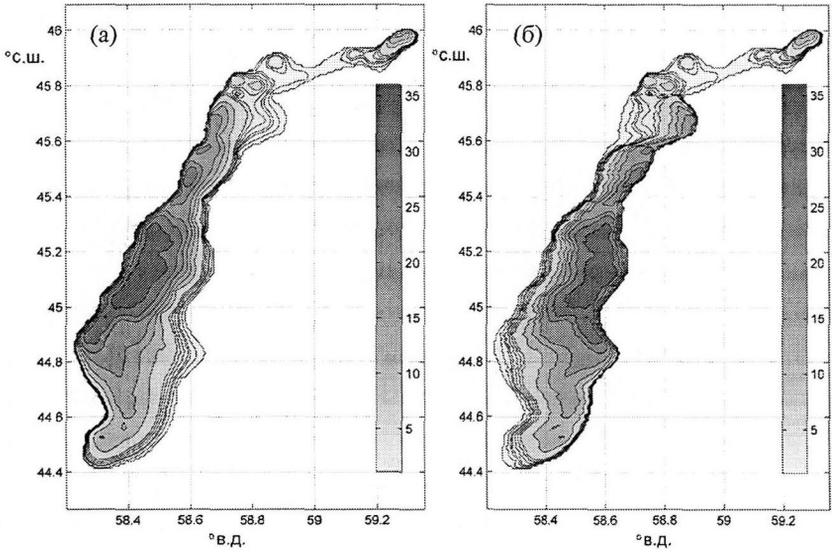


Рисунок 4. Сетка глубин, использованная в модельных экспериментах в случае реального рельефа дна (а) и инвертированного рельефа дна (б).

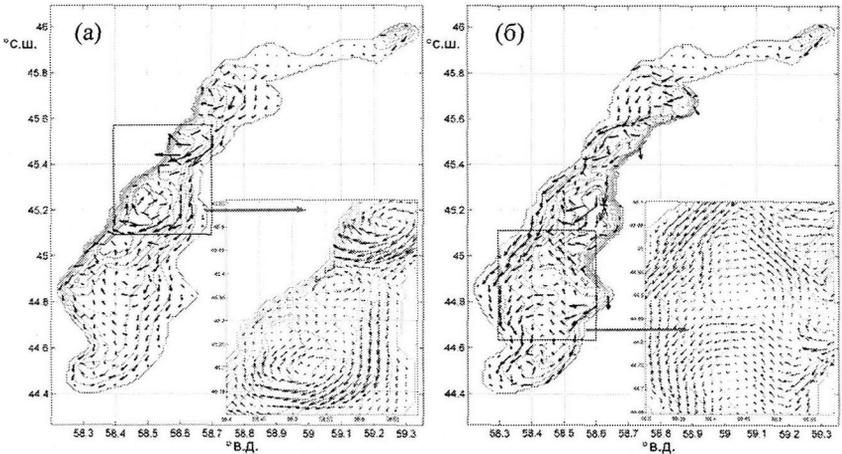


Рисунок 5. Результаты моделирования циркуляции вод в поверхностном слое стратифицированного бассейна в случае реального рельефа дна (а) и инвертированного рельефа дна (б).

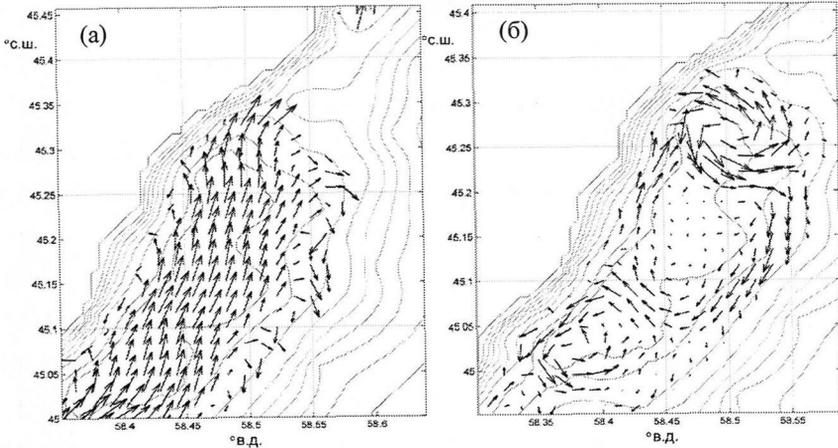


Рисунок 6. Результаты моделирования циркуляции вод в придонном слое бассейна в случае нестратифицированной (а) и стратифицированной (б) водной колонны.

Другим важным выводом, вытекающим из результатов выполненных модельных экспериментов, является установленное влияние стратификации на характер придонной циркуляции. В случае однородной водной толщи общее движение вод в придонном слое (здесь имеется в виду глубоководный участок котловины, расположенной вдоль западного берега бассейна) организуется в направлении против действия ветра и не обладает выраженной завихренностью (рис. 6а). В этом случае знак циркуляции на глубоководном участке не изменяется с глубиной от поверхности до дна. Введение в эксперимент основанной на натурных наблюдениях стратификации вод резко меняет картину течений в придонном слое бассейна. В глубоководной части моря происходит формирование циклонического вихря, т.е. знак циркуляции меняется с глубиной на противоположный (рис. 6б). Кроме того, общий поток распадается на несколько циклонических круговоротов суб-бассейнового масштаба (что косвенно подтверждается и некоторыми данными прямых наблюдений). «Инвертирование» распределения глубин качественно не

изменяет картину течений в придонном слое как в случае стратифицированного, так и в случае однородного бассейна.

В разделе 4.3 представлены выводы по четвертой главе.

В заключении сформулированы основные результаты:

В период с 2009 по 2013 гг. в осенне-летний сезон гидрологическая структура западного бассейна Большого Аральского моря имела «трехслойный» вид, характеризовавшийся наличием двух локальных максимумов солености в поверхностном (толщина 10–15 м в августе и сентябре, до 20 м в ноябре) и придонном (верхняя граница на глубинах 25–30 м) слоях, разделенных более пресным и относительно холодным промежуточным слоем.

Вертикальной структуре термохалинных полей Большого Арала присуща значительная межгодовая изменчивость, связанная, по-видимому, с вариациями водообмена между западным и восточным бассейнами. Так, в момент практически полного высыхания восточного бассейна в августе 2009 года величины поверхностного и придонного максимумов солености были близки друг к другу. Впоследствии интенсивность водообмена возросла вновь, и в сентябре 2010 года разность поверхностного и придонного значений солености приблизилась к 15 г/кг. Однако в дальнейшем величины придонного максимума солености постепенно снижались на фоне роста солености поверхностного слоя ($\Delta S = 12,8$ г/кг в ноябре 2011 г. и 6,9 г/кг в сентябре 2012 г.).

В западном бассейне Аральского моря сохраняется антициклонический характер поверхностной циркуляции в условиях преобладающих ветров. Развитие отклика на ветровое воздействие происходит по следующему сценарию:

- Происходит интенсивное воздействие преобладающих ветров северных румбов.
- В течение 5–7 часов развиваются направленные на юг поверхностные течения, приобретающие наибольшую интенсивность на восточном мелководье

(величины скоростей до 25 см/с). Вместе с развитием течений уровень моря в южной части бассейна начинает расти, формируется его наклон вдоль продольной оси бассейна. Спустя примерно сутки в западной глубокой части бассейна формируется направленное на север поверхностное течение.

- Придонные компенсационные течения начинают развиваться с установлением продольного наклона уровня преимущественно на востоке. Затем возникает придонное течение противоположного направления на западе. Придонные течения приобретают максимальную интенсивность (скорости до 15 см/с) через 40–45 часов после начала ветрового события.

Результаты численного моделирования отчетливо демонстрируют изменение знака поверхностной циркуляции на противоположный при инвертировании рельефа дна относительно продольной оси бассейна. Как показали модельные эксперименты, циклонический круговорот в придонном слое возникает лишь при наличии в бассейне значительной вертикальной плотностной стратификации. Модельные эксперименты позволили также установить, что круговорот в придонном слое включает в себя меньшие циклонические круговороты суб-бассейнового масштаба.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю доктору географических наук П.О. Завьялову. Автор благодарит своих соавторов и коллег за плодотворное сотрудничество и полезные обсуждения результатов. Автор также благодарит коллег из Института геологии и геофизики им. Абдуллаева (Узбекистан) и Международного казахско-турецкого университета (Казахстан) за помощь в организации и проведении экспедиционных работ. Автор особенно признателен E. Roget (Университет г. Жирона, Испания) за оказание содействия при проведении численных экспериментов, Д.М. Соловьеву (МГИ, Севастополь) за регулярно предоставляемые им спутниковые изображения, а также А.А. Осадчиеву, Г.В. Айзелю и Е.С. Ковалевой за поддержку при подготовке диссертационной работы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ижицкий А.С. Гидрофизическое состояние Большого Аральского моря осенью 2013 г.: термическая структура, течения, внутренние волны / А.С. Ижицкий, Е.Е. Химченко, П.О. Завьялов, А.Н. Серебряный // *Океанология*. – 2014. – Т. 54. – № 4. – С. 451–463.
2. Izhitskiy A.S. On thermohaline structure and circulation of the Western Large Aral Sea from 2009 to 2011: Observations and modeling / A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov, E. Roget, H.P. Huang, A.K. Kurbaniyazov // *Journal of Marine Systems*. – 2014. – Vol. 129. – P. 234–247.

Работы, опубликованные в других изданиях:

3. Завьялов П.О. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия / П.О. Завьялов (ред.), Е.Г. Арашкевич, И. Бастига, А.И. Гинзбург, С.Н. Дикарев, Л.С. Житина, А.С. Ижицкий, Д.П. Ишниязов, А.Г. Костяной, В.И. Кравцова, Т.В. Кудышкин, А.К. Курбаниязов, А.А. Ни, А.Б. Никишина, М.А. Петров, А.Ф. Сажин, Ф.В. Сапожников, Д.М. Соловьев, В.М. Хан, Н.А. Шеремет – М.: Наука, 2012. – 228 с.

Тезисы докладов:

4. Ижицкий А.С. Особенности гидрологии вод Аральского моря летом 2009 г. / А.С. Ижицкий, П.О. Завьялов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, ИКИ РАН. – 2010. – С. 211.
5. Izhitskiy A.S. Latest Data on Thermohaline Structure and Circulation of the Dying Aral Sea / A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov // *Geophysical Research Abstracts*. – 2010. – Vol. 12. – EGU2010-855.
6. Izhitskiy A.S. Latest Observations of Thermohaline Structure and Circulation of the Dying Aral Sea / A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov // *Geophysical Research Abstracts*. – 2011. – Vol. 13. – EGU2011-533.
7. Izhitskiy A.S. Circulation and thermohaline structure of the Aral Sea in the last three Years / A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov // *Geophysical Research Abstracts*. – 2012. – Vol. 14. – EGU2012-482.
8. Izhitskiy A.S. Hydrological state of the Large Aral Sea in the fall season of 2013 / A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov // *Geophysical Research Abstracts*. – 2014. – Vol. 16. – EGU2014-1033.

Ижицкий Александр Сергеевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

**ТЕРМОХАЛИННАЯ СТРУКТУРА И ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД
БОЛЬШОГО АРАЛЬСКОГО МОРЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА**

Подписано в печать 19.09.2014 г.

Заказ № 10225 Тираж: 150 экз.

Печать трафаретная. Объем: усл.п.л. – 1,5

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru
