

УДК 551.464+557.465

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ОБЛАСТИ
РЕКА-МОРЕ (НА ПРИМЕРЕ КОЛЬСКОГО ЗАЛИВА)****С.И. Бардан**¹, канд.биол.н.,
Б.Н. Долгонос², д-р техн. н. ,
Н.Г. Сербов³, канд. геогр. н.¹Мурманский морской биологический институт,
ул. Владимирская, 17, 183010, Мурманск, Россия, bardan@gmail.com,²Институт водных проблем,
ул. Губкина, 3, 101000, Москва, Россия, borismd@aqua.laser.ru,³Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, serbov@odeku.edu.ua

Рассматривается процесс переноса растворенных солей в зоне смешения река–море на начальных стадиях смешивания. С использованием уравнения конвективно-диффузионного переноса примесей с переменным коэффициентом диффузии, выполнен анализ процессов для окрестностей поверхностей раздела растворов. По аналитическому решению, градиентные микротечения поперек оси удлинения образуют двухстороннюю прослойку гидродинамического запирающего слоя, с эффектом блокирования диффузионного переноса ионов, что способствует сохранению и устойчивости слоистых структур. Представлены результаты натурных измерений для Кольского залива, подтверждающие теоретические выводы. Ламеллярная структура формируется в зонах начального контакта вод разного генезиса, откуда выходит устойчивый пучок изогалин 10–33‰, который распространяется вдоль слоя с изогалиной 24,7‰, расширяясь с сильным замедлением при устойчивом угле наклона этой границы, раздела области река–море.

Ключевые слова: область река–море, слоистые структуры, конвективно-диффузионный перенос, торможение диффузионного переноса, гидродинамический запирающий слой, фрактальный рельеф.

1. ВВЕДЕНИЕ

Устойчивые структуры ламеллярного типа (слоистые) в прибрежных водах формируются везде, где приток материковых вод является достаточным для устойчивого воспроизводства образующихся растворов [1–5]. В верхней части зон смешения проходит снос осолоняемых вод в сторону моря (стоковые течения), в нижней части — компенсационный перенос частично опресняемых морских вод из прибрежной зоны (противотечение) [1,4–7]. Упорядоченные в деятельном слое моря по плотности [2,4,6], растворы разных степеней разбавлений морских вод образуют сложную систему каскадной трансформации примесей в зоне смешения вод разного генезиса [8]. По форме слоистого пакета смесей такие системы называют *laminated structure in the mixing zone of river and marine water* (по межд. термин., *англ*) или ламеллами зоны смешения река–море. В целом, всю область принято рассматривать как ступенчатую, многослойную структуру [4,5,9,10]. По материалам прямых наблюдений, подсистемы в зоне смешения выявляются по вертикальному распределению образуемых смесей: плотности (σ), температуре (T_w) и солёности (S) [4].

Расслоение водной толщи с образованием много-

численных и устойчивых поверхностей разделов, только одна из характерных особенностей данных зон [1,11]. Благодаря различиям физико-химических свойств разных разбавлений морских вод, разнообразные формы трансформации веществ, проходят в смежных слоях ламелл, в пределах одного и того же сечения перпендикулярного оси сноса стоковым течением [12–15]. Специфические свойства отдельных прослоек зоны смешения, формируются под влиянием концентрационных разностей морских солей-полиэлектролитов в смежных парах растворов [2,4,8,16]. Под их влиянием, в разных прослойках ламелл проходит, как формирование условий, так и физико-химические процессы изменения миграционных форм примесей в составе смесей [3,11,15]. Особо выделим, что такие изменения сопровождаются практически полным самоочищением от большинства миграционных форм, не наблюдаемых в геохимическом классе морских растворов [8]. Общая эффективность этих процессов достигает 98–99% [2], что распространяется и на антропогенные загрязнения. Такие явления приводят к ряду последствий, имеющих важное геохимическое и экологическое значение для всей прибрежной зоны моря [2,7,8,13].

Помимо гравитационной (механической седимен-

тации), самоочищение водной среды в ламелле река-море связано с вкладом множества других, тесно сопряженных в пределах слоистых структур, процессов [7,11,12,15]. Анализ экспериментальных данных показывает, что большинство явлений развиваются по степенной кинетике [15,17-19]. Развитие таких процессов в областях река-море связано с образованием множества барьерных обстановок в прослойках ступенчатых структур [12-18]. По данным наблюдений, в составе ламелл зоны смешения устойчиво формируется каскадная система сопряженных физико-химических (ФХБ), биологических и биогеохимических барьерных обстановок [2, 8-10,12,16]. При этом каскады ФХБ воспроизводят слоистую структуру зоны смешения и характерную для нее упорядоченность промежуточных растворов [6,12-15]. По тем же причинам каскады являются четко ориентированными в горизонтальной и вертикальной плоскости: любые типы барьеров вытянуты по направлению сноса контактирующих вод и упорядочены по плотности в толще зоны смешения [12-15,17-18]. Совокупность растворов ламелл и существующие в них концентрационные разности морских солей-полиэлектролитов, поддерживают стабильность барьерных обстановок на каскадах ФХБ, выполняя по отношению к ним, функции физической опоры и инициатора физико-химических процессов, массивно протекающих в этих областях [9,10,12,13].

Экспериментальные или теоретические исследования начальных стадий смешения вод разного генезиса, в результате которого для целого класса водных объектов формируются устойчивые слоистые структуры [1,2,5,7 и др.], в литературе носят единичный характер [19]. Сходная ситуация обстоит с исследованием сопряженных с зоной смешения каскадов ФХБ, определяющих интенсивность самоочищения водной среды от загрязнений. Совместно это определяет низкую изученность процессов для областей река-море [9,10,14]. Для промежуточных растворов из зоны смешения считают, что приливные течения и интенсивное ветро-волновое воздействие приводят к их быстрому перемешиванию. Ламеллы эстуарных зон и прибрежной области, даже в условиях субарктических морей России, устойчиво воспроизводятся и функционируют круглогодично, включая длительный период при минимальном объеме притока пресных вод материка [6,9-11,20]. При этом время обновления смешанных вод охватывает диапазон от нескольких часов до 10^2 суток [1,7,13]. Сама проблема выявления физических механизмов устойчивости слоистых структур зоны смешения, до настоящего времени, не получила должного освещения. С другой стороны, процессы, сопровождающие образование поверхностей раздела зоны смешения по ходу их сноса в море, следует рассматривать как стационарный процесс, в

самых разных условиях [1,2,13-14]. Оценки последствий растягивания границ раздела контактирующих вод, например, для функционирования приустьевых, речных или прибрежных морских экосистем, также отсутствуют.

Задачи аналитического описания и моделирования этих явлений, как и их влияние на разные компоненты экосистем, пока уклончиво игнорируется. Подавляющее большинство исследований в этой области сводится к полевым измерениям и накоплению экспериментальных данных. При этом систематические материалы инструментальных наблюдений, относящиеся к областям начального контакта вод разного генезиса, за редким исключением не приводятся [1,14,15]. Наиболее сложные из современных региональных моделей, разработанные для прибрежных вод (эстуариев) и применяемые при выявлении особенностей режимов смешения или изучения трансформации примесей, традиционно используют трехмерную постановку задач и «жесткую» расчетную сетку [3,4,7]. Но, фактически это приводит к игнорированию физического содержания самих явлений, заменяя ее подгонкой под данные измерений. Для систем описывающих перенос примесей между жидкостями разного состава известно несколько аналитических решений (одно- или двумерных моделей) с разным режимом перемешивания. Примеры их решения приводятся в [19,22,23] и используются по ходу изложения нашей работы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Одна из сложностей прикладного и теоретического анализа процессов областей река-море связана с отсутствием методов и общепризнанных критериев для выделения и аналитического описания поверхностей внутренних разделов между растворами ламелл зоны смешения. С другой стороны, формирование многослойных структур, ориентированных по направлению сноса стоковыми течениями и глубинным противотечением, можно рассматривать как стационарный процесс [1,7,14]. В нашей работе натурные данные по зонам смешения Кольского залива используются как иллюстративный материал, помогающий понять и интерпретировать полученные на моделях, теоретические результаты. Преимущественно, мы рассматриваем данные STD-зондирования для объектов с регулярными наблюдениями. На рис. 1 приводится схема Кольского залива и положение таких объектов зон смешения на этой акватории.

Линией на продольном разрезе через залив «С» (рис.1) показано положение оси судового хода Кольского залива.

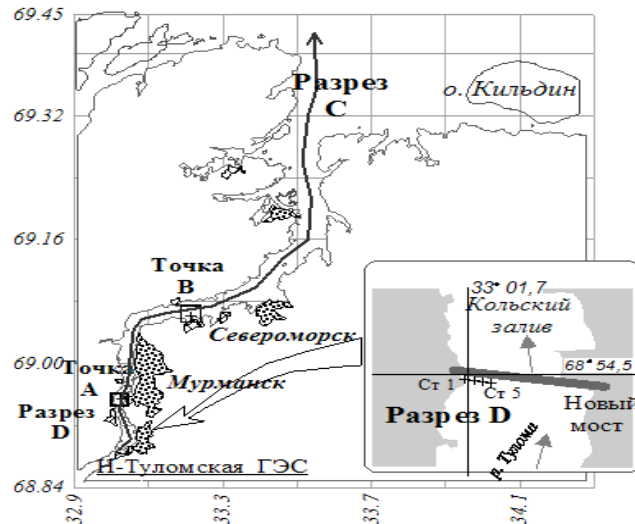


Рис.1 - Схема Кольского залива с положением точек и разрезов регулярных наблюдений за структурой зоны смешения: А - точка наблюдений в Южном колене; В – точка наблюдений в Среднем колене; С - продольный разрез по судовому ходу (осевая линия); D - поперечный разрез в области начального контакта вод (врезка)

Отсчет расстояний для этого разреза (L_i) ведется от бьефа Нижнетуломской ГРЭС – области начального контакта морских и пресных вод. Ориентация разреза соответствует направлению сноса смешанных вод Кольским стоковым течением (КолСТ), протяженность которого составляет $L \approx 60$ км. Период обновления вод в ламелле зоны смешения зависит от сезонов года, в среднем, оцениваясь диапазоном 3–10 суток [14].

Основной массив данных получен зондом *SEACAT SBE 19 plus*: точность измерений по температуре $\pm 0.005^\circ\text{C}$, электропроводности ± 0.001 См/м и давлению (глубина) $\pm 0.1\%$ [24]. Эти данные контролировали послойным отбором проб серийными стандартными батометрами, с определением S (‰) проб на стационарном солемере ГМ-65.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ

Прямыми наблюдениями за характеристиками зоны смешения прибрежных областей моря установлено, что в состав растворов образующих слоистые структуры, входит определенный диапазон промежуточных смесей образованных взаимодействием вод разного генезиса [13,14]. По мере сноса перемешанных вод в открытое море, они постоянно возобновляются, что является причиной формирования в областях перемешивания, множества прослоек из промежуточных растворов морских солей, устойчиво наблюдаемых круглогодично [12-15,17-18]. Из-за особенностей измерения солёности (S , ‰) по электропроводности для сильных степеней разбавлений

морских вод пресными, в качестве критерия выделения отдельных областей многослойных структур в ЗС, нами используется параметр I_w — объемная доля содержания пресной воды в смесях морских и материковых (в долях или %) [1,13]. Значение параметра I_w рассчитывается по уравнению вида [13]

$$I_w = \frac{S_0 - S_i}{S_0 - S'_0}, \quad (1)$$

где S_i — солёность (‰) или концентрация морских солей-полиэлектролитов в растворах морских вод (промежуточных смесей); S_0 — начальная концентрация солей для морских нетрансформированных вод, поступающих в зону смешения; S'_0 — то же для материкового стока, причем, в ультрапресных водах региона минерализации менее 75 мг/л [14].

В [13, 14] показано, что если для некоторого диапазона смесей, ограниченного парами растворов I_w^i : $\{I_1 - I_2\} = \text{const}$, вдоль оси сноса перемешанных вод определять глубину их залегания (H_i), то можно оценить положение и характеристики границ разделов между прослойками растворов, включающих последовательность разных степеней разбавлений. Полученные по условию $I_w^i = \text{const}$ глубины H_i , функционально связаны с расстоянием L_i , отсчитываемым от точки начального контакта взаимодействующих вод разного генезиса [14,15,17,18]. Распределение H_i по сечениям вдоль оси сноса вод либо для наблюдений в одном и том же сечении (точке), обра-

зуют контуры изолиний I_i , выделенных по условию: $I_w^i = \text{const}$, которые соответствуют областям распространения смесей заданного I_w -диапазона. Наборы таких сечений через ЗС (зоны смешения) позволяют, на основе детальных данных определять параметры поверхностей внутренних разделов сложной формы, между разными областями ламелл: линейные размеры, длину по сечениям I_i , площадь и объемы прослоек данного диапазона смесей и т.п. Очевидно, что полученные этим способом характеристики слоя, как и границ их раздела, относятся только к данной зоне смешения при конкретных условиях. Использование таких наблюдений и характеристик поверхностей в целях теоретического анализа, требует процедур приведения к нормальному виду — масштабирования. Этот прием используется при анализе потока соли через границу структур зоны смешения для данных, приведенных в координаты безразмерных характеристик, при введении множителей [14].

4. СХЕМА И МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ

На основании натуральных данных, смешение вод с полной метаморфизацией состава пресного стока [8], в области река–море, может рассматриваться как каскадный процесс перемешивания многокомпонентных растворов морских солей-полиэлектролитов, представленных водами разного генезиса. В качестве предварительной схемы перемешивания, нами применяется трехступенчатое представление процесса, в котором каждая ступень может включать несколько стадий, идентификация которых возможна по ряду характерных особенностей строения и изменению параметров отдельных подсистем, устойчиво наблюдаемых в зонах смешения [13,14,18].

Первая ступень перемешивания (взаимодействия) проходит в приустьевой зоне впадающих в море рек и рассматривается как область начального контакта морских и материковых вод. Это наименее освещенная материалами наблюдений зона, обычно выпадающая из области исследований, как гидрологии, так и океанологии. Характерный период процессов протекающих на этой ступени, оценивается нами в 10^0 - 10^2 с. Процессы 2-й ступени перемешивания и трансформация структур зоны смешения проходят в пределах эстуарной зоны. На его начальной стадии наблюдается быстрое расширение объемов прослоек ламелл при характерном периоде 10^3 - 10^4 с. На этой стадии в толще вод сохраняются различия для вертикальных и горизонтальных градиентов: ($dI_w/dH \neq \text{const}$ или $dS/dH \neq \text{const}$) и ($dI_w/dL \neq \text{const}$ или $dS/dL \neq \text{const}$), включая и

параметры поперечных оси сноса сечений. С формированием устойчивой слоистой структуры в верхней части ламелл, наступает стадия пространственной ориентации. Это продолжительный период существования слоистых структур с характерным временем 10^5 - 10^6 с, при сохранении общей тенденции к выравниванию вертикальных градиентов: dI_w/dH или $dS/dH \sim \text{min} \rightarrow \text{const}$, по соответствующим сечениям зоны смешения в заливе. Заключительная 3-я ступень, наступает при критическом состоянии структуры прослоек за счет фронтального и бокового расширения в ламеллах, что приводит к «истощению» слоистой структуры: утончению границ разделов смежных областей. Далее развивается процесс быстрого «растворения» всей слоистой структуры, по направлению «сверху-вниз» (в область распространения истинно морских вод), в окружающих водах прибрежья соответствующей степени их трансформации [15,16]. Обычно 3-я ступень перемешивания проходит за пределами котловин классических эстуариев [7,14].

Следовательно, процесс формирования, развития и устойчивого существования слоистой структуры в зоне смешения, составляет содержание первых двух ступеней [13,14]. Количественно начальные стадии формирования ламелл могут анализироваться в рамках двух моделей переноса пассивных примесей в водных растворах, позволяющих проведение анализа процессов и имеющих разные формы своих аналитических решений. Во-первых, на основе модели изотропной турбулентности с конвективно-диффузионным переносом [21], во-вторых, по ламеллярной модели, учитывающей диффузионный перенос через границы раздела [19,22]. Обе эти модели рассматривают явления переноса между парами контактирующих жидкостей, через непрерывно растягиваемую граничную поверхность раздела, в некоторой, обобщенной системе типа жидкость–жидкость. В нашем случае, растягивание границ проходит за счет фронтального и бокового растекания, с участием градиентных течений [1,5]. При этом за счет растягивания контуров I_i поверхности раздела по этим сечениям, рост доступного объема вдоль ее малых окрестностей (прилегающих к любым внутренним поверхностям), инициирует ряд физических эффектов [19], определяемых свойствами данного агрегатного состояния (слабые растворы жидкости). Они и являются объектом анализа конвективно-диффузионного уравнения переноса примесей, выполненного в этой работе.

5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перенос примесей через внутренние границы раздела в жидких средах протекает в ходе перемешивания растворов разного состава и разнообразия условий смешения: от области взаимодействия речных и морских вод [2,3,13], которая в Русской Арктике занимает всю прибрежную часть моря, до любых потоков, проникающих в основную водную массу, различных водных объектов. Очевидно, что в таких системах, перенос примесей проходит через внутренние поверхности раздела сложной формы, контуры которых для отдельных сечений, далее будем обозначать символом l_i . Совокупность процессов наблюдаемых в естественных условиях для большинства областей взаимодействия вод разного генезиса, определяется генерированием нескольких физических эффектов [19,22,23]. Например, в изолированных водных объектах при их незначительных размерах, действуют ограничения на удлинение границ сечений l_i поверхностей. В замкнутых емкостях, при перемешивании взаимодействующих растворов, образуются другие условия - с ограничениями на рост площади поверхности контакта и т.п.

Наиболее характерной чертой процесса перемешивания растворов в области река-море, отличающей ее от других областей, является устойчивый и однонаправленный перенос смешанных вод в сторону моря [1-3,13-15,17-18]. В наибольшей степени это выражено для верхней части ламелл зоны смешения, в которых формируются приповерхностные стоковые течения [1,2,5]. В естественных условиях такая особенность приводит к непрерывному растягиванию

поверхностей раздела образующихся при начальном контакте вод в зоне смешения. Прямым следствием сноса смешанных вод является устойчивый прирост суммарной площади граничной поверхности, разделяющей воды разного генезиса. В ходе такой деформации границ любые структуры ламелл зоны смешения непрерывно обновляются, сохраняя и воспроизводя промежуточные смеси, при общей высокой устойчивости всей системы к внешним воздействиям разного рода [1,2,13,15,17-18].

Условия и формулировка задачи в ламеллярном режиме. Рассмотрим процесс переноса примеси между двумя растворами в рамках ламеллярной модели общего вида. Аналитическое решение данной задачи приводилось в работах [19,21-23,25]. На рис. 2 приводится общая схема переноса примесей через границу раздела при контакте растворов с ламинарным (последовательным) течением, соответствующим условиям в области река-море.

Пространство, в котором протекают рассматриваемые процессы, в общем случае трехмерное: для полного описания явлений в зоне контакта требуется применение соответствующих систем отсчета. Примем, что произвольный вектор скорости в выделенных точках (\mathbf{v}), может быть представлен матрицей-столбцом компонентов по этим осям [26]. Определение скоростей деформации жидкости в элементарных объемах ограниченных на рис. 2 сечением через точки [a,b,c,d], соответствует анализу локальных движений векторами \mathbf{v} , подчиняясь правилам для сплошных сред, которые описываются уравнениями гидродинамики: состояния, неразрывности, движения и сохранения энергии, с учетом соответствующих свойств [3,4,21-23,25,26].

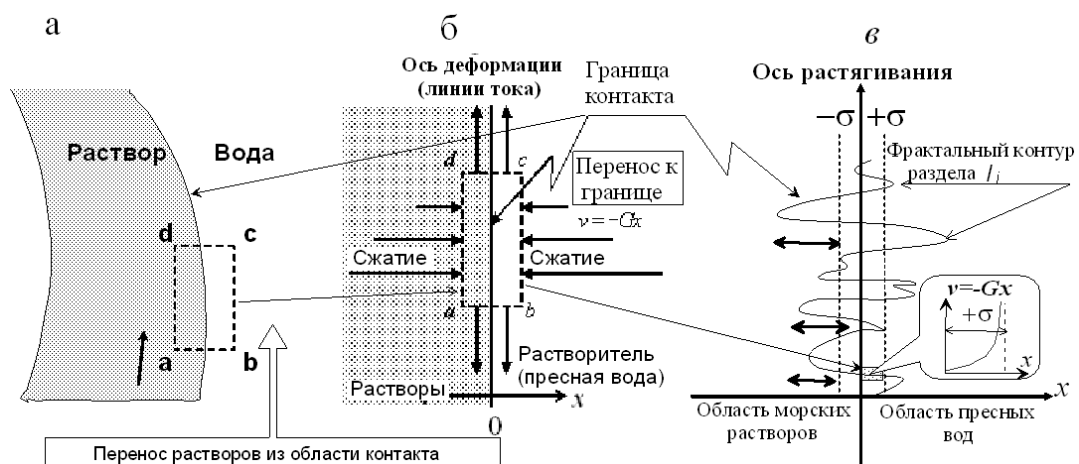


Рис.2 - Схема процессов переноса на границе раздела при ламинарном режиме течения для жидкостей разного состава, показаны направления общего течения и ось растягивания границ раздела: а — элемент части контура внутреннего раздела [abcd] ламеллярной структуры; б — схематизация процессов в выделенном элементе и для достаточно малых окрестностей вдоль границ; в — схема фрактального мезорельефа по сечению l_i , выделен диффузионный слой $\sim \delta$, на врезке - профиль скорости v в области пограничного слоя $\sim \delta$ при растягивании

Уравнение конвективно-диффузионного переноса, записанное относительно концентраций (c), имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}c) = D\Delta c, \quad (2)$$

где D – диффузия, \mathbf{v} – поле скоростей, c – пространственные координаты. Условия несжимаемости жидкости вида: $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ позволяют записать уравнение (2) в форме

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c = D\Delta c, \quad (3)$$

В своей работе мы анализируем процессы протекающие, преимущественно, в пределах элементарных объемов. При этом на схемах рис. 2, приведена только часть сечений контура l_i [a,b,c,d], наиболее удобная для рассмотрения, Решаемая задача переноса примеси через границу раздела, а также действующих деформаций явлений, требуют их предельной схематизации в выделяемых элементах для самой возможности их аналитического описания дифференциальными уравнениями общего вида (3). Поэтому, для анализа и упрощения выражений, принимаем, что явления индуцируемые растягиванием границ элемента проходят в плоскости [a,b,c,d] – применяемая система отсчета, двухосевая. Процесс деформации элементов рассматривается в сечениях через малые участки границ, которая, очевидно, включает часть примыкающих к ней достаточно малых окрестностей по обе стороны. Для определенности принимаем, что на рис. 2б ось x направлена из насыщенного солями раствора, в сторону пресных вод, с низким содержанием солей (меньшей плотности). Тогда начало координат и все точки с координатой $x = 0$, располагаются по границе контакта между растворами, по контуру l_i (рис. 2).

В паре контактирующих жидкостей разного состава их смежные слои, при ламинарном режиме переноса растворов и до любой другой, для всех $x = 0$ по направлению течения – ось переноса является линией тока жидкости. Тогда, при любых деформациях поверхности раздела разделяющей растворы разного состава, процесс ее сжатия-удлинения будет приводить к деформациям в элементах ограниченных точками [a,b,c,d]. Далее предположим, что выделенные на рис. 2а,б и ограниченные в точках [a,b,c,d] элементы, в окрестности границы раздела прикреплены к ней своими сторонами: ab и cd . Очевидно, что множество таких элементов образует цепочки неограниченной длины, которые по оси сноса растворов,

соответствуют сечению границы контуром длиной l_i (рис. 2). Деформация, соответствующая удлинению границ в сечении [a,b,c,d], проходит в плоскости перпендикулярной оси x . Отметим, что оси отсчета x_i , совпадающие в момент t_0 с глобальными прямоугольными координатами, в общем случае (спустя Δt), трансформируются в криволинейную систему координат [3,26].

Из приведенной схемы следует, что любое сжатие-растягивание границы раздела приводит к деформациям: а) самого контура l_i и выделенных элементов, б) прослоек в окрестности границ, в) их сцепок или бесконечных цепочек (рис. 2в). При условии о несжимаемости жидкости по (2) и неразрывности сплошной среды, любой из элементарных участков должен сохранять неизменность геометрического объема, в который входит часть окрестностей границы – прослойки контактирующих растворов, примыкающих к разделу. Формализуем условие о неразрывности среды выделенных на рис. 2 элементов уравнением

$$V = hA = \text{const}, \quad (4)$$

где h – характерный размер элементов (см. далее), A – площадь сечения, проходящего через границу раздела, ограниченная точками [a,b,c,d].

По условию о сохранении объема (4), в случае удлинения границы по оси контура l_i (рис. 2в), любой произвольный элемент приграничных структур вида [a,b,c,d], будет сжиматься по нормали к прилегающему участку границы (рис. 2а,б). Деформация приводит к тому, что другие стороны выделенного элемента: ad и bc , будут с некоторой скоростью приближаться к границе раздела с двух сторон. Для выделенного на рис. 2а,б сечения [a,b,c,d], такой процесс возможен только при изменении геометрических соотношений (пропорций) противоположных сторон ($ab = cd$ и $ad = bc$), располагающихся в разных по составу жидкостях и разделенных границей по контуру l_i .

Выполнение такого условия необходимо и достаточно для обеспечения несжимаемости: $V = \text{const}$. Относительные скорости точек элементов на схемах рис. 2 в сечениях [a,b,c,d], для любого типа деформаций, запишутся системой уравнений [26]

$$dv/dt = T\mathbf{v}, \quad (5)$$

где \mathbf{v} – вектор движения, T – тензор скорости (произведение оператора Гамильтона на вектор).

Любой из тензоров (T) описывающих относительную скорость деформации элементов сплошных сред, по принципам тензорного анализа, раскладывается на две компоненты: симметричную - обозначим (G) и кососимметричную (T_0): $T = G + T_0$ [21,23,26]. Для определения относительной скорости точек подставим его в формулу (5а), откуда получим выражение: $dv/dt = Gv + T_0v$. Анализ движения для точек [a,b,c,d] выполняется на плоскости, для которой компоненты кососимметричной части T описывающие вращательную составляющую v (rotv): $T_0 = 0$, откуда (5а) можно записать как

$$dv/dt = Gv, \quad (5а)$$

Учитывая приведенные условия, допущения и обозначения переменных, относительная скорость поперечного сжатия выделенных на рис. 2 элементов [a,b,c,d], индуцированная удлинением границы раздела длиной l_i , описывается симметричной частью G тензора напряжений (рис. 2). Напряжения создаются в окрестностях границы, ламинарным течением в смежных слоях контактирующих жидкостей, что согласуется с условиями в (3).

Выражения (2-5) и условия их выполнения соответствуют положениям гидромеханики и свойствам жидкости установленным для сплошных сред [3,23,26]. Поэтому, изменение геометрического размера разных сторон элементов типа [a,b,c,d], располагающихся в контактирующих жидкостях и секущихся границей раздела, при растягивании l_i индуцирует в ее окрестностях, поперечные к оси деформации микротечения. В каждой из контактирующих жидкостей, микропотоки направлены из основной массы раствора в область границ раздела. Это соответствует изменению соотношений противоположных сторон деформируемых элементов $ab = cd$ и $ad = bc$, по условию несжимаемости: $V = const$.

Принимая во внимание приведенные соображения, а также свойства жидкости, очевидно, что всякое удлинение элемента [a,b,c,d], вместе с ростом длины границ при растягивании l_i , будет приводить к увеличению доступного объема в области примыкающих к границе прослоек. Аналитически, деформацию растягивания элемента вида [a,b,c,d] при изменении отношений его сторон ad и bc , можно описать несколькими способами.

Во-первых, вводим характерный поперечный размер для сечения элементов, который выше обозначен нами (h). Тогда изменения соотношения сторон по (t), в дифференциальной форме запишется уравнением вида

$$\frac{dh}{dt} = -Gh, \quad (6а)$$

где h – характерный поперечный размер в сечении [a,b,c,d], G – скорость деформации границ выраженная симметричной частью тензора T , генерируемого

течением, совпадающим по направлению с осью удлинения элементов (рис. 2б).

По (6а), скорость деформации, описываемая G , в общем случае связана с положением выделенного элемента на границе раздела контура l_i , т.к. форма границ, со временем может приобретать любую кривизну, а оси движения не сводятся к прямым линиям [26]. Поэтому величина G будет меняться за счет неустойчивости растягивания границ l_i во времени, соответственно форме приобретаемой поверхностью раздела: знаком кривизны прилегающих участков [23].

Во втором способе, выполним дифференцирование приведенного выше условия о неразрывности жидкости в выделенном у границ элементе по (4): $V = hA = const$, где h - характерный размер, A – площадь сечения в точках [a,b,c,d]. Используя уравнение для скорости деформации по (6а), результат дифференцирования принимает форму

$$\frac{dA}{dt} = GA. \quad (6б)$$

Физический смысл обоих дифференциальных уравнений вида (6а,б), сводится к тому, что любой малый элемент расположенный вдоль границ раздела и обладающий характерным масштабом соответствующим свойствам жидкости (поперечный размер в h или площадь сечения A по (6б), при удлинении сечения будет растягиваться со скоростью пропорциональной изменению данного характерного размера. По уравнениям (6) и направлению осей на схеме процесса рис. 2б, скорости G имеют противоположные знаки (\pm) для окрестностей, прилегающих к границе на ее разных сторонах. Это обеспечивает условие о неизменности объема при неразрывности для элемента по (4): $V = hA = const$. Поэтому численно, скорость деформации элементов у границы пропорциональна скорости изменения геометрических размеров сечений, показанных на рис. 2, по соотношению его противоположных сторон.

При этом обе окрестности, примыкающие к границе раздела, совместно образуют пограничный слой [26,27]. Через него осуществляется процесс диффузионного переноса примесей при условии отсутствия деформации границы (растягивания-сжатия). Диффузионный слой характеризуется определенной толщиной δ , величина которого определяется свойствами жидкости, гидродинамическими условиями у границ раздела (тензор T) и зависит от свойств диффундирующих веществ, учитываемых D – коэффициентом диффузии данного вещества в среде. Для условий решаемой задачи переноса, вывод уравнения для оценки толщины пограничного слоя δ приводится в [19,27]. В них, одним из авторов получено выражение используемое ниже

$$\delta = \sqrt{\frac{2D}{G}}. \quad (7)$$

Согласно содержанию аргументов (7) и диапазону коэффициентов D ионов морских солей-полиэлектролитов в водных растворах, размер области занятой диффузионным слоем у поверхности раздела, соответствует выделенным на рис. 2 окрестностям границ элементов ограниченных [a,b,c,d]. В этих окрестностях, деформация растягивания формирует направленные к границе микропотоки жидкости из основной массы контактирующих растворов.

В случае турбулентного режима течения в реальных системах смешения растворов, поверхности разделов между жидкостями (в растворах, материковых или морских водах), будут дополнительно растягиваться за счет вихревых пульсаций генерируемых в потоке [5,19,21]. Это приводит к формированию на поверхностях раздела фрактальных форм макро-, мезо- и микрорельефа [19,27]. Микро- и мезорельеф такой поверхности и схематизация процессов для случая турбулентного режима, приводятся на рис. 2в. Учитывая тип рельефа, размер элементарных участков по контуру раздела, будем выбирать много меньше, чем характерные размеры пульсаций формирующих мезо- и микрорельеф изменяющейся (растягивающейся) поверхности раздела (рис. 2в) и зависящие от свойств контактирующих растворов [3,21].

Прирост длины границы при растягивании l_i и удлинение элемента [a,b,c,d], приводит к увеличению доступного объема в диффузионном слое. По условиям в (4-6), при такой деформации прирост будет пропорционален изменению геометрических размеров длины контура l_i (см. выше). По условию о неразрывности (4), любой прирост объема этой области должен быть сразу заполнен жидкостью (рис. 2). Рассмотренная выше деформация элементов расположенных вдоль границ раздела «нулевой» толщины (бесконечной сцепки элементов), в примыкающих к ней малых окрестностях, индуцирует процесс притока-оттока жидкостей, направленный по нормали к оси удлинения. В процессе деформации l_i противоположно направленные микропотоки будут наблюдаться в обеих окрестностях. Согласно обозначению аргументов (4-6) и осям на рис. 2, скорости равны

$$v = \pm Gx. \quad (8)$$

Из ур-я (8) скорость микропотоков индуцируемых деформацией растягивания, в направлении перпендикулярном оси удлинения поверхности раздела, пропорциональна расстоянию x отсчитываемому от границы («нулевой» толщины): скорость растет по модулю, с увеличением расстояния x , на самой границе по (6а,б): $v = 0$.

На рис. 2б согласно направлению оси x , в области $-\infty < x < 0$ находятся растворы с высокой концентрацией морских солей (обозначим их как насыщенный «раствор» или морская вода), а в области $0 < x < \infty$ – раствор без примеси (растворитель или «речная вода»). Для этого случая форма уравнения переноса между растворами по (3), для лагранжевых

координат с системой отсчета привязанной к границе раздела (метод подвижного анализа [26], с редукцией оси сноса в проекцию точки на плоскости) принимает вид [19,27]

$$\frac{\partial c}{\partial t} - Gx \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad (9)$$

где x – ось и координата, перпендикулярная границе раздела, $c(x,t)$ – концентрация примеси в точке x для момента t , D – коэффициент диффузии примесей.

Принимаем, что концентрация морской соли в области занятой не трансформированными морскими водами (вдали от границ раздела), будет равна C_0 , а в области их растворителя (материковых вод) они полностью отсутствуют – это граничные условия в (9)

$$c(-\infty, t) = C_0, \quad c(\infty, t) = 0. \quad (9a)$$

Для ламеллярной модели существует важное ограничение, позволяющее правильно интерпретировать получаемые результаты. Оно относится к тому, что в записи (9а), расширение областей занимаемых контактирующими растворами, будет иметь физический смысл в том случае, если толщина переходного слоя (соответствующая толщине диффузионного слоя или размеру границ раздела), будет намного меньше поперечных размеров примыкающих к границе прослоек контактирующих растворов (рис. 2). Хотя в записи граничных условий (9а), это соответствует $\pm \infty$. Далее будем считать, что приведенные условия о соотношении физической толщины границ и размера разделяемых прослоек растворов выполняются, что очевидно в большинстве случаев. Далее, для аналитического решения (9) представим его в безразмерной форме, используя процедуру масштабирования, с преобразованием аргументов по формулам вида

$$t = t' / G, \quad x = \delta x', \quad c(x, t) = C_0 f(x', t'),$$

где $\delta = \sqrt{2D/G}$ – толщина диффузионного слоя по (7).

Получим такую систему уравнений (здесь и в последующих выкладках штрихи опущены)

$$\frac{\partial f}{\partial t} - x \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) его требуется дополнить начальными и граничными условиями, которые по условиям безразмерной задачи, запишем в виде

$$c(x, 0) = C_0 \bar{\theta}(x), \quad c(-\infty, t) = C_0, \quad c(\infty, t) = 0, \quad (10a)$$

здесь C_0 — исходная концентрация основных ионов морских солей, на удалении от границ раздела морских и пресных вод; параметр $\bar{\theta}(x) = 1 - \theta(x)$, а символ $\theta(x) = \{0, x < 0; 1, x > 0\}$ — соответствует функции Хевисайда. Отметим, что условия в (10а), для модели в размерной форме (9), соответствуют тем

же граничным условиям.

На первый взгляд, безразмерная форма уравнения переноса по (10), представляет собой известное в гидрологии и океанологии одномерное уравнение адвекции-диффузии. Его решение известно при разных условиях и проводится, при обычном в этом представлении допущении, о постоянстве коэффициента диффузии: $D = \text{const}$. Для полученной нами системы (10), коэффициент $D \neq \text{const}$ и не может быть принят в качестве постоянного. С этим связана главная особенность изучаемого в настоящей работе процесса переноса через границы внутренних разделов в жидкостях. Как это показано в (5-8), модуль скорости диффузии-адвекции и соответствующий им приток жидкости в область окрестностей примыкающих к границе, пропорционален расстоянию до нее - координатам по оси x , перпендикулярной оси деформации.

Проводим решение (10), для чего допустим, что ионный перенос морских солей по оси x численно равен диффузионному потоку $J(x, t)$. Тогда скорость изменения концентраций c у границ раздела, будет равна отрицательному градиенту потока, что запишем

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}.$$

Сравнивая его с уравнением (10), получаем выражение

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -x \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}.$$

Интегрируя, получим уравнение потока соли через границу, общего вида

$$J = -\frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x} - xf + \int_{-\infty}^x f(x') dx' + C. \quad (11)$$

Отметим, что в (11) постоянная интегрирования C должна выбираться так, чтобы поток соли вдали от границ раздела, отсутствовал (согласно 10а). Для потока запишем это условие как

$$J(\pm\infty, t) = 0, \quad (11a)$$

Перенос в стационарном состоянии. Для получения общего решения по модели (10) представленной в (11), рассмотрим стационарное состояние системы. По условиям в задаче переноса, оно устанавливается в области границ раздела по истечению некоторого промежутка времени, прошедшего от момента начального контакта. Формально, это режим непрерывной деформации границы раздела при ее растягивании.

Для этого состояния переменные $\partial f / \partial t = 0$, а профиль концентраций c ионов морских солей по оси x , в модели (10) должен удовлетворять дифференциальному уравнению

$$xf' + \frac{1}{2} f'' = 0. \quad (12)$$

Общее решение для (12) при граничных условиях (10а) и (11а), имеет вид

$$f = \frac{1}{2}(1 - \Phi(x)), \quad (13)$$

где $\Phi(x)$ – символ интеграла Френеля вида [26,27]

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du.$$

С учетом (13) и соотношений известных для интеграла Френеля, получим выражение

$$\int \Phi(x) dx = x\Phi(x) + \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}},$$

по которому находим значение интеграла входящего в модель (11)

$$\int_{-\infty}^x f(x') dx' = \frac{1}{2} x(1 - \Phi(x)) - \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} = xf + \frac{1}{2} f'. \quad (14)$$

При подстановке этого интеграла в уравнение переноса по ламеллярной модели в (11), получаем для суммарного потока: $J(x) = C$, - поскольку все члены, зависящие от x , взаимно сокращаются. Полученное для (11) выражение стационарного состояния системы определяется выполнением условия (11а) о нулевом приросте примесей на удалении от границ раздела между растворами, откуда сама величина переноса соли в его потоке через границу: $C = 0$.

Таким образом, в стационарном состоянии с растягиванием границ, диффузионный поток ионов морских солей через границу раздела между растворами разного состава, численно: $J(x) = 0$.

Причем, при всех x , включая и малые окрестности раздела, а не только вдали от границы растворов разного состава, что следует из условий в системах (9-10).

Фактически, в стационарном решении, полученном в (11), для ионного потока получено, что в режиме растягивания границы раздела, вдоль нее возникают локальные условия, поддерживающие исходные свойства контактирующих растворов и структуру системы в целом. Учитывая дифференциальные уравнения вида (6а,б), такие условия формируются с обеих сторон разделяющей граничной поверхности: рассматривается случай продольного сечения контуром длиной l_i (рис. 2б,в). По стационарному решению (11), величина потока поперечного оси деформации по линии тока жидкости: $J(x) = 0$. Это соответствует тому, что диффузионный перенос и перемешивание двухкомпонентной системы растворов, при устойчивом растягивании внутренних границ, проходить не будет либо снижается до минимума (см. далее). Очевидно, что этот случай распространяется на много-

слоистую систему, т.е. состоящую из n прослоек.

Микротечения формируются в обеих окрестностях поверхности раздела l_i и имеют масштаб, соизмеримый с толщиной δ диффузионного слоя между прослойками слоистых структур зоны смешения. При этом, т.к. диффузия в режиме растягивания границы, по (11) подавляется микропотоками (массопереносом) направленными в область границы, то для контактирующих растворов, с высокой вероятностью, будут сохраняться их исходные свойства. Поэтому, решение (11) позволяет сделать вывод, что до тех пор, пока на данном участке проходит растягивание границ по линии тока, с нарастающей длиной его сечения l_i , то будет существовать и стационарный режим, поддерживающий устойчивый состав контактирующих растворов с разных сторон разделяющей их границы раздела. При приведенных граничных условиях формируются следующие эффекты: с одной стороны, сохраняется исходный состав смешивающихся жидкостей у границ контакта, с другой – формируется и сохраняется слоистая структура зоны смешения области река-море.

Таким образом, при соблюдении формальных требований к логическим преобразованиям (метод от противоположного) и корректности аналитических выражений (9-14), для определенных условий получен теоретический вывод о формировании запирающих прослоек в пограничном слое, имеющих гидродинамическую природу (см. ба,б, 9-11). Их влияние эквивалентно существованию блокирующего ионную диффузию эффекта вдоль растягиваемой поверхности раздела, образуемой растворами разного состава. Для тепловых потоков, соответственно механизму переноса, за счет роста температурных градиентов на границах раздела, наблюдается интенсификация процессов переноса – противоположный эффект. Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что при возникновении стационарного режима деформации, растягивания и сжатия внутренних поверхностей разделов, образуемых контактом растворов разного состава по контуру, включающему малые окрестности вдоль границы, формируются поперечные оси удлинения градиентные микротечения, со скоростями $v = \pm Gx$, образующие двухстороннюю прослойку гидродинамического запирающего слоя, блокирующего диффузионный перенос и поток ионов между растворами разных разбавлений, причем, за счет роста температурных градиентов вдоль границ слоистой структуры, такой слой приводит к усилению переноса потоков тепла в условиях размывания диффузионного слоя. По нашему мнению, запирающий слой гидродинамической природы и связанные с его формированием эффекты: блокирование диффузии при одновременном росте интенсивности теплопереноса через границы, определяют общую устойчивость многослойных структур в зоне смешения.

Масштабы и размер запирающего слоя. Учитывая преобразования в системе (11) при использовании интеграла Френеля, перейдем в (13) к размерным

переменным, по которым можно, при их соответствующих преобразованиях, получить аналитическое выражение для распределения концентраций c в окрестностях границы внутреннего раздела контактирующих растворов

$$c = (C_0/2)(1 - \Phi(x/\delta)). \quad (15)$$

Используя метод размерностей и смысловое содержание аргументов (15), можно прийти к заключению, что характерная толщина запирающего гидродинамического слоя будет пропорциональна размерам диффузионного слоя, близкого к реальному размеру границ: численно $\delta = \sqrt{2D/G}$ - равно или близкое к размерам гидродинамической прослойки. В целом, это соответствует логике полученного выше решения в задаче переноса ионов по (11) и уравнениям (4-6), описывающих изменения параметров для области у границы раздела. При этом по решению (9-11), в пакете, составленном прослойками растворов, будут отсутствовать разрывы поверхностей разделяющих отдельные слои по оси растягивания: от области начального контакта, до любой из точек на контурах l_i . Это определяется тем, что действует условие сохранения размера прослоек, обеспечивающего устойчивое превышение размеров диффузионного слоя δ .

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерное время формирования стационарного режима при растягивании граничной поверхности разделов, согласно размерности аргументов (6-8) и изложенным соображениям, пропорционально G^{-1} . При характерных градиентах скоростей деформации $G \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, время формирования запирающего слоя и стационарного распределения концентраций примеси у границ раздела, может составлять промежуток порядка минут или даже часов. Поэтому, чтобы наблюдать действие запирающей прослойки гидродинамической природы за счет микротечений, время процесса должно быть больше чем G^{-1} . Процессы с близким временем наблюдаются, в первую очередь, в местах массивированного впадения речных вод в море (см. выше). Другими примерами, могут быть, поступление загрязненных вод с реками в озера, а также достаточно медленные процессы перемешивания растворов в технологических очистках [19,22,23,27].

Эффекты запирающего слоя и устойчивость ламелл зоны смешения. Исходя из результатов анализа ламинарной модели (9-10) и аналитического решения для стационарного состояния по (11), формально, молекулярный перенос между прослойками ламелл зоны смешения, может возобновиться в двух случаях. Во-первых, при нарушении стационарного режима, во-вторых, за счет истощения элементов ламеллярной структуры. Отметим, что истончение прослоек многослойной ламеллы и ее внутренних границ – процесс необратимый: определяется удалением любого из поперечных сечений от точки начального контакта

вод разного генезиса, при фронтальном (в составе стоковых течений) и боковом (к берегам котловины) растекании ступенчатой структуры. Отметим, что в реальных зонах смешения река-море, боковое растекание слоистой структуры является давним объектом исследований, а некоторые его эффекты, приводятся в [1,3,4,20].

Нарушение стационарного режима растягивания границ, формально соответствует стабилизации линейных размеров отдельных участков сечения по контуру раздела длиной l_i . Используя обозначения настоящей работы, это можно записать: $l_i = const$, при $\Delta l_i = 0$, тогда поток $J(x) \neq 0$. Здесь l_i – геометрический масштаб, соответствующий размеру характерных участков контура по оси сноса – линии тока и направлению растягивания (рис. 2в). Условия для другого случая возникают тогда, когда поперечные размеры хотя бы одной из прослоек контактирующих растворов, истончающиеся (уменьшающиеся) по ходу растягивания границы, закономерно становятся соизмеримыми, с масштабом запирающего перенос гидродинамического слоя, – линейным размером граничной поверхности, близкой к масштабу диффузионного слоя. Тогда размер данной прослойки в ламелле зоны смешения будет соизмерим с толщиной диффузионного слоя: $\delta = \sqrt{2D/G}$ [27]. Для этого случая допустимо применение формального условия для потока: $H_i \approx \delta$, и тогда поток $J(x) \neq 0$. Здесь H_i – геометрический масштаб прослоек между поверхностями разделов слоистых структур. При таких условиях исходное допущение, сделанное для (9-11), что между собой граничат две жидкости с толщиной смежных слоев, каждый из которых превышает толщину переходного слоя между ними, не будет соответствовать условиям в (9а). Формально процесс блокирования диффузии и поддержания высоких температурных градиентов – прекращается, запирающий гидродинамический слой размывается процессом диффузии Фика [3, 11, 20]. В этих условиях будет протекать процесс переноса солей через границу и величины температурных градиентов на границах раздела – восстанавливаются. При этом исчезновение одной из прослоек за счет ее «истощения», может завершаться формированием нового слоя в зоне смешения.

Отметим, что эффект связанный с истощением границ и прослоек многослойной структуры в ЗС, возникает сразу после контакта морских и материковых вод. Это следует из масштабов $G \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ с и размера диффузионного слоя δ (см. выше) и может сопровождаться как каскадным нарастанием общей толщины слоя, разделяющего воды разного генезиса, так и, вероятно, количеством граничных поверхностей раздела. Формально, это процесс истощения многослойной системы прослоек, связан с перемежающейся диффузией, прерываемой возникновением запирающих слоев при сохранении деформации растягивания. Его можно рассматривать как одно из условий формирования всей слоистой структуры -

ламелл зоны смешения, завершающейся формированием устойчивого расслоения толщи вод, занятой взаимодействующими растворами в форме их «пакета», упорядоченного по плотности и ориентированного в пространстве.

Причем, даже в стационарном состоянии или близком к нему, на поверхностях разделов неизбежно образуются локальные условия с деформациями G близкими к нулю. На таких участках торможение диффузии также не имеет места. По крайней мере, это распространяется на области локальной неустойчивости – при перегибах поверхности раздела (изменение знака кривизны, рис. 2в). Здесь будут формироваться условия, когда какой-то достаточно малый участок: $l_i = const$. В окрестностях этих участков происходит локальный рост диффузионного потока соли через границу раздела по (11). Подобное локально-стохастическое перемешивание растворов по контуру l_i , всегда будет проходить на отдельных участках. Поэтому, для условий в (9-10) образуется «вилка»: существуют аналитические решения задачи определения «характерного периода» перемешивания, например, с разным режимом течений.

Дифференциация ионов ламеллами. Для коэффициента диффузии в уравнениях (9-10) отметим, что по (13) и (15), толщина запирающего слоя на границе раздела будет увеличиваться в случае роста коэффициента D отличающегося для разных веществ. С другой стороны, она уменьшается с ростом градиентов скорости поперечных микротечений у границ контактирующих растворов. Поэтому, даже для небольших градиентов скоростей G , как и типичных, для водных растворов значений $D \sim 10^{-5}$ см²с⁻¹, запирающий гидродинамический слой будет иметь существенное влияние на состав растворов в разных частях ламелл. Это причина специфической избирательности по отношению к разным веществам, несмотря на незначительность размеров: размер диффузионного слоя имеет порядок $\delta \sim 10^{-1}$ см.

Поэтому, при наличии нескольких не взаимодействующих друг с другом в водных растворах ионов-полиэлектролитов с разными коэффициентами D , каждый из них будет иметь свою толщину запирающего слоя, что определяется свойствами веществ и водной среды. Поэтому для разных степеней разбавления морских вод, существует спектр величин D и соответствующий ему спектр для толщины блокирующего слоя (численно близкого δ или равного ему). Это подразумевает дифференциацию солевого состава по степеням разных разбавлений морских вод, находящихся в разных областях ламелл зоны смешения река-море.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ТРАНСФОРМАЦИИ ЗОН СМЕШЕНИЯ

Результаты измерений гидрофизических параметров: плотности (σ), температуры (T_w) и солёности (S), в областях реальных зон смешения река-море показывают, что при удалении от точки начального кон-

такта морских и материковых вод, их распределение в зонах смешения устойчиво поддерживает слоистую структуру в разных условиях. Для выявления характера трансформации ламелл по оси сноса контактирующих вод, рассмотрим данные детального зондирования разреза «С» акватории Кольского залива. Общая длина охваченной наблюдениями части ~50 км, диапазон глубин от 6 до 340 м (рис. 1). Трансформация ламелл зон смешения по оси сноса вод Кольским Стоковым Течением (КолСТ) – соответствует «длине» перемешивания по оси сноса [13,14]. Представлены данные для эстуарной области, от $L_1 = 8.3$ км до порога на выходе из залива $L_2 = 58.7$ км, соответствующих расстоянию от основного источника материковых вод, - нижнего бьефа Туломской ГРЭС, где проходят процессы начального контакта морских и материковых вод.

На рис. 3 приведены материалы STD-зондирования солености (S , ‰), для разных сезонов и с различной интенсивностью действующих на зоны смешения сил (приливов, нагонов, ветро-волнового воздействия и т.п.). На рис. 3а приведено распределение для весеннего периода за 29.05–1.06.2001, при построении использовали данные 25 станций, длина рядов $n = 3500$. На рис. 3б для осеннего сезона 6–8.09.2001, использовались данные 24 станций, с длиной ряда $n = 2130$.

Шкалы глубин на рис. 3 экспоненциальные, изогалины проведены для характерных значений S и границ отдельных областей (A , B и C), выделяемых в зонах смешения [14,15]. Оси абсцисс соответствуют расстоянию от бьефа Туломской ГРЭС (L , км), как источника пресных вод. Штриховкой в толще зоны смешения Кольского залива выделен слой содержащий промежуточную смесь при $S = 24.7\text{‰}$ — барьерную обстановку основного физико-химического барьера области река–море НЗ [12-15,16]. На дополнительных построениях выделен угол наклона $\text{tg}\alpha_i$ этой поверхности. У стрелок, аббревиатурами показано выклинивание отдельных контуров l_i для обстановок каскада ФХБ, делящих ламеллу зоны смешения Кольского залива на характерные области A - C , с разными свойствами [14,15]. Среднедекадные объемы поступления материковых вод в залив, для периодов съемок, по данным многолетнего осреднения стока, составляло $0.45 \text{ км}^3/\text{дек}$ и $0.25 \text{ км}^3/\text{дек}$ [6,14]. Согласно рис. 3, этот фактор определяет наклон слоя с ФХБ НЗ, значения для $\text{tg}\alpha_i^{H3}$: 0.000133 (весна, рис. 3а) и 0.000868 (осень, рис. 3б), при $\text{tg}\alpha_1 < \text{tg}\alpha_2$.

Примерные координаты точки начального контакта: $L \approx 1\text{-}2$ км и $H \approx 6\text{-}7$ м, более точное их определение, по этим материалам затруднительно. Исходя из рис. 3, максимальное сближение пучка изогалин приходится на самую точку начального контакта морских

и материковых вод. Из нижней части примыкающей к ней области морских вод, отходит плотный пучок изогалин, в интервале 8–32‰. В этом пучке средней линией является слой смесей включающих изогалину ~24.7‰, остальные оконтуривают содержащий ее слой и, могут менять свою конфигурацию. Выделим, что при всем разнообразии условий на акватории залива (как в текущем распределении, так и по сезонам), на расстоянии от точки начального контакта ~30-60 км, в структуре ламеллы зоны смешения этот пучок расширяется с сильным замедлением - изогалины практически не расходятся. При этом наклон прослойки с обстановкой типа НЗ также не изменяется, $\text{tg}\alpha_i^{H3} \approx \text{const}$ для данных условий (весна-осень).

Именно в этом слое промежуточных растворов формируется обстановка главного (термодинамического) барьера для областей река-море ФХБ НЗ [12,13]. Длительность существования такого пучка изогалин и квазистационарного состояния ламеллы, при средней скорости КолСТ до 0.12 м с^{-1} , оценивается для весеннего сезона не менее чем 3-5 сут, а в среднем за год ~7-8 сут [14,15]. При анализе пучка изогалин на рис. 3а,б следует учесть, что шкала глубин - экспоненциальная: любые отклонения имеют нелинейный характер и хорошо заметны.

Приведенные данные указывают на квазистационарность состояния ламеллы зоны смешения при устойчивой деформации растягивания внутренних поверхностей раздела, определяемого фронтальным сносом КолСТ и боковым - к берегам залива, расширяющегося в направлении переноса. Это состояние соответствует стационарному профилю распределения для солености (ионного состава смесей) слоистой структуры, по всем сечениям зоны смешения. Отметим, что слои ламеллы образуемые смесями разных разбавлений морских вод (сильных lmA и средних lmB , см рис. 3), во-первых, примыкают к береговой линии, в т.ч. в области начального контакта, во-вторых, отделены от прямого соприкосновения с геохимическими разновидностями истинно морских вод прослойкой растворов морских вод слабых разбавлений (lmC).

По условию примыкания к слою слабых разбавлений морских вод $S \leq 24.7\text{‰}$ — это обстановка термодинамического барьера ФХБ НЗ [14,16], ограничивающая всю структуру ламелл зоны смешения снизу. Для слоя с $24.6 \leq S \leq 24.7\text{‰}$, температура замерзания смесей (τ) равна температуре максимальной плотности (θ): параметры особой точки в растворах морской соли, при $\tau = \theta = -1.332^\circ\text{C}$ и $\sigma_0 = \sigma_\tau = 19.852$ [3,11,20].

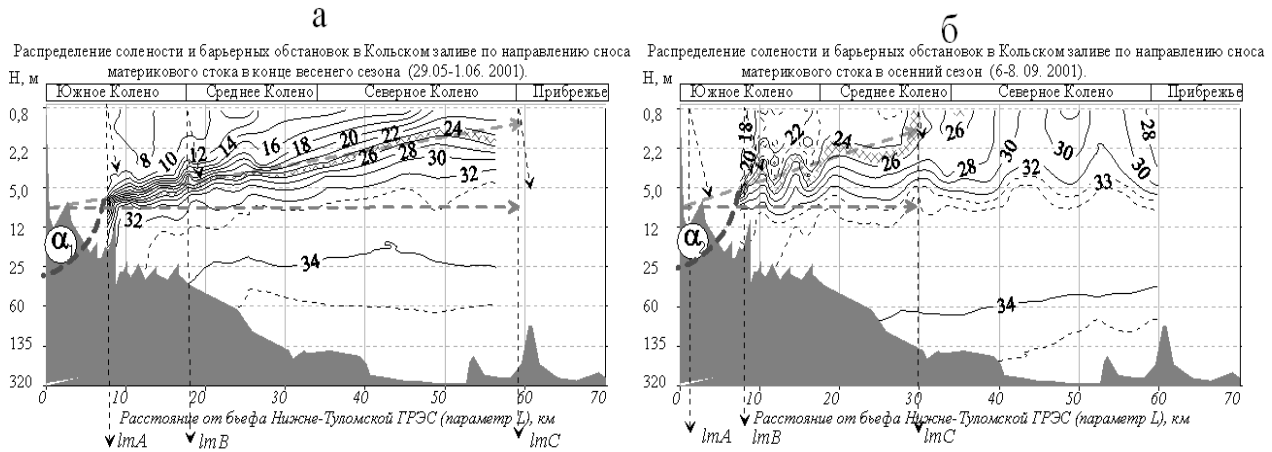


Рис. 3 -Материалы STD-зондирования солёности (S , ‰) по оси Кольского залива (Баренцево море) в разные сезоны. По оси ординат — экспоненциальная шкала глубин (H , м), по оси абсцисс — расстояние от бьефа Нижнетуломской ГРЭС (L , км); основные изогалины — через 2‰, пунктиром — вспомогательные, штриховкой выделен слой с обстановкой ФХБ при $S = 24.75\%$ и угол его наклона $\text{tg } \alpha$, стрелками показаны зоны выклинивания разных контуров l_i : а — распределение S весной за 29.05–1.06.2001; б — распределение S осенью 6–8.09.2001

В разделенной этим слоем системе растворов, морская и материковая ветви перемешивания сосуществуют в зоне смешения, как автономные, активно взаимодействующие подсистемы, каждая из которых обладает собственной сложной структурой [12-15]. Обе ветви перемешивания, подчиняясь сходному комплексу действующих сил и факторов, по-разному реагируют на внешние воздействия, что определяется физическими свойствами составляющих их растворов морских солей [3,11,12,14,15,20]. Очевидно, что для приведенных на рис. 3 структур, угол α - наклон поверхности слоя ФХБ НЗ содержащего прослойку $S = 24.7\%$, определяет всю конфигурацию зоны смешения. С ним связано и расстояние выклинивания обстановок каскада ФХБ на уровень поверхности моря.

Таким образом, ламинарная модель течения жидкости, разобранный в настоящей работе в нескольких формах (4-6, 9-11, 15), вполне объясняет большинство особенностей для системы внутренних границ разделов контактирующих растворов, наблюдаемых в естественных условиях. Получило свое физическое объяснение и аномальная устойчивость ламелл зоны смешения, уникальная для подвижной водной среды. С другой стороны, в рамках таких моделей сложно получение аналитических выражений, описывающих процесс формирования слоистой структуры и ее эволюцию для разных стадий. Для решения этих задач, требуется привлечение других форм конвективно-диффузионных моделей и систем уравнений. Например, полученных в [19,21-23,25,27], по данным перемешивания растворов разного состава.

8. ВЫВОДЫ

1. Получены теоретические выводы о формировании особого слоя у границ разделов, с физическим эффектом блокирующим ионный перенос и ускоряющего теплопередачу через границы разделов растворов морских вод с разной степенью разбавления пресным стоком. По решению уравнения переноса примеси, до тех пор, пока проходит деформация растяжения границ, существует стационарный режим с блокированием процессов диффузии ионов, при росте $\text{grad } T_w$ и $\text{grad } S$. В режиме с растягиванием границ внутренних разделов, диффузионное смешение жидкостей проходить не будет либо снижается до минимума, тогда как теплопередача через границу будет интенсифицироваться.

2. Установлено, что при возникновении стационарного режима деформации растягивания-сжатия на внутренних поверхностях раздела образуемых контактом растворов разного состава, по их контуру, включающему малые окрестности контактирующих растворов, формируются поперечные оси деформации - градиентные микротечения со скоростями $v = \pm Gx$, образующие двухстороннюю прослойку с гидродинамическим запирающим слоем, блокирующим диффузионный обмен и поток ионов между растворами разных разбавлений морских вод, при одновременном усилении потоков тепла через границы слоистой структуры за счет роста $\text{grad } T_w$ и $\text{grad } S$.

3. По результатам моделирования переноса примесей по ламеллярной модели, показаны:

а – условия для формирования гидродинамического запирающего слоя, индуцированного компенсационным притоком жидкостей к контуру l_i бесконечной длины, сформулированы условия для его прекращения;

б - каскадность процесса нарастания объема и количества прослоек в ламеллярных структурах, по направлению удаления любого сечения от области начального контакта, определяемого «истощением» толщины прослоек в системы разбавлений морских вод, что является одним из факторов формирования расслоения толщи воды, охватываемой процессом перемешивания ЗС.

4. Согласно полученным решениям, для разных степеней разбавления морских вод, существующий спектр величин D морских солей-полиэлектролитов, формирует соответствующий ему спектр значений δ для толщины границ блокирующих их перенос. Этот фактор способен приводить к процессу дифференциации солевого состава в системе разных разбавлений морских вод, наблюдаемой в натуральных условиях для областей река-море.

5. Образование слоистой структуры при контакте морских и пресных вод с разным ионным составом (вод разного генезиса), по результатам теоретического анализа и натурным данным является совместным результатом:

а - переноса промежуточных растворов из зоны начального контакта - удаления любого из сечений слоистой структуры от этой точки и утончения ее прослоек;

б - действия сил приводящих к устойчивой деформации поверхностей раздела при фронтальном и боковом растекании ламелл зоны смешения;

в - локальности условий стационарности: режима деформации растягивания внутренних границ разделов слоистых структур, имеющих фрактальные формы микро- и мезорельефа.

6. Эффект, генерируемый свойствами жидкости на микроуровне, в прослойках с масштабом $\delta \sim 10^{-3}$ м и временем $t \sim 10^{-1}$ с, приводит к последствиям, реализуемым как устойчивая ламелла зоны смешения река-море, с характерным периодом существования $t \sim 10^4 - 10^6$ с, на масштабах $L \sim 10^3 - 10^5$ м.

7. Конфигурация разделов ламелл зоны смешения определяется условиями, формирующими угол наклона прослойки, содержащей обстановку $HЗ$ ($tg\alpha$). Угол наклона функционально связан с процессом истощения всей структуры ламелл: утончением прослоек и разделяющих их границ, являясь следствием растягивания стоковым течением.

8. В зоне смешения река-море, выявленные эффекты приводят к устойчивому воспроизводству промежуточных растворов морских вод разной степени разбавления и непрерывному обновлению уча-

ствующих в перемешивании вод разного генезиса. Совокупность растворов ламелл зоны смешения содержащих концентрационные разности морских солей-полиэлектролитов, является инициатором протекающих в области река-море процессов трансформации примесей и поддерживает стабильность барьерных обстановок в каскадных структурах ФХБ, выполняя по отношению к ним, функции носителя таких свойств.

9. Анализ данных, полученных наблюдениями за характеристиками внутренних границ разделов слоистых структур области река-море Кольского залива, позволяет сделать вывод о качественном соответствии теоретического исследования результатам прямых измерений. На примерах показано, что значительная часть изменчивости в разных подсистемах ламелл и сопряженного с нею каскада ФХБ, наблюдаемых в зоне смешения акваторий с океанической соленостью (в разные сезоны года), может быть интерпретирована как изменение угла наклона α слоя смесей формирующих обстановку термодинамического барьера река-море.

Рассмотренный в рамках современных теоретических представлений о явлениях в системах приведенного рода, процесс переноса ионов морских солей через поверхности внутренних разделов, в натуральных условиях проходит в глобальном масштабе. Он охватывает большую часть прибрежной зоны морей при отсутствии разрывов на внутренних поверхностях раздела в зоне смешения, вплоть до размывания слоистых структур. Мы считаем, что применяемый в работе подход и полученные при теоретическом анализе решения, позволяют получать более детальную информацию о состоянии водных объектов в областях река-море. В том числе, появляется перспектива выполнения количественного анализа процессов на каскадах физико-химических и биогеохимических барьеров прибрежных зон моря, обеспечивающих процесс самоочищения водной среды в условиях роста ее загрязнения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод: [монография]/ К. Боуден. - М.: Мир, 1988. - 324 с.
2. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии: [монография]/ В.В. Гордеев. - М.: Наука, 1983. - 160 с.
3. Шулейкин В.В. Физика моря: [монография]/ В.В. Шулейкин. - М.: Наука, 1968. - 1083 с.
4. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов: [монография]/ К.Н. Федоров. - Л.: Гидрометеоздат, 1983. - 296 с.

5. Roberts P.J. R., Webster D. *Turbulent diffusion. Environmental fluid mechanics — Theories and Application*. Reston: ASCE Press, 2002. 467 p.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.1, Баренцево море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / Под ред. Ф.С. Терзиева. - Л.: Гидрометеониздат, 1992. - 182 с.
7. Долгополова Е.Н. Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам/ Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова // Водные ресурсы. - 2010. - Т.33, № 3. - С. 274–291.
8. Вернадский В.И. История минералов земной коры. Т.2. История природных вод: [монография]/ Избранные сочинения. - Т.IV. - Кн. 2. - М.: Изд. АН СССР, 1960. С. 7–538.
9. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в морях и океанах: [монография]/ А.П. Лисицын. - М.: Наука, 1994. - 450 с.
10. Emelianov G.M. *The Barrier Zones in the Ocean*. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 636 p.
11. Злобин А. Экосистемы водорослей в изменяющихся условиях среды обитания (Теория, эксперимент, предположения): [монография]/ А. Злобин, В. Нянишкене, Н. Путинцев. - Вильнюс: Моклас, 1987. - 296 с.
12. Бардан С.И. Классификация биологических барьеров и ее использование на примере термодинамических барьеров в морях Русской Арктики/ С.И. Бардан // Материалы Межд. науч. конф. «Современные климатические и экосистемные процессы в уязвимых природных зонах» (г.Ростов-на-Дону, 5-8 сентября 2006 г.). Ростов-на-Дону: Изд. ЮНЦ РАН, 2006. - С. 22-25.
13. Бардан С.И. Система однородных показателей при количественном описании смешения морских и пресных вод и классификационные критерии деления областей их взаимодействия /С.И. Бардан // Природа морской Арктики: современные вызовы и роль науки: Тез. докл. Междунар. науч. конф. (г. Мурманск, 10-12 марта 2010 г.). Апатиты: КНЦ РАН, 2010. - С. 24–27.
14. Бардан С.И. Количественный анализ и динамика области смешения морских и материковых вод Южного колена Кольского залива (Баренцево море) / С.И. Бардан // Изучение и освоение морских и наземных экосистем в условиях арктического и аридного климата: Мат. межд. науч. конф. (Ростов-на-Дону, 6–10.06.2011). Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. - С. 20–24.
15. Бардан С.И. Оптические характеристики зоны смешения морских и пресных вод в Южном колена Кольского залива (Баренцево море) в летний сезон /Н.Г. Сербов // Украинский гидрометеорологичний журнал.- 2011. - № 9. - С. 210-219.
16. Перельман А.И. Изучая геохимию... (О методологии науки): [монография]/ А.И. Пельман. М.: Наука, 1987. - 152 с.
17. Бардан С.И. Суточная изменчивость гидрохимических параметров в начальный период органотрофной фазы функционирования экосистемы Кольского залива (Баренцево море) /С.И. Бардан, Т.Г. Ишкулова. // Изв. РАН. Сер. Географ. - 2010. - №4. - С. 90–100.
18. Бардан С.И.. Характеристика амилолитической активности водной среды в Кольском заливе для осеннего периода и анализ факторов определяющих её уровень/ С.И. Бардан, Г.А. Корнеева. // Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики: Материалы междунар. науч. конф. (Мурманск, 27-30 октября 2010 г.). - 2010. - Вып. 10. - С. 18–25.
19. Долгоносков Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидробиологических процессов: [монография] /Б.М. Долгоносков. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. - 440 с
20. Зубов Н. Морские воды и льды: [монография]/ Н.Н.Зубов. - М.: Гидрометеониздат, 1938. - 453 с.
21. Drummond I.T., Munch W. Turbulent stretching of line and surface elements. *J. Fluid Mech.*, 1990, vol. 215, pp. 45-59.
22. Muzzio F.J., Ottino J.M. Dynamics of a lamellar system with diffusion and reaction: Scaling analysis and global kinetics. *Phys. Rev.*, 1989, A 40 (12), pp. 7182–7192.
23. Ottino J.M., Rantz W.E., Macosko C.W. A lamellar model for analysis of liquid—liquid mixing. *Chem. Eng. Sci.*, 1979, vol. 34, pp. 877.
24. *SBE 19plus SEACAT PROFILER. User Manual. Version 012*. Bellevue, Washington, DC, 2005. 137 p.
25. Rantz W.E. *Fluid mechanical mixing – lamellar description. Mixing of Liquids by Mechanical Agitation*. New York: Gordon and Breach, 1985. 15 p. (Eds: Ulbricht J.J., Patterson G.K.).
26. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Теория моделирования и возможности ее применения в трибологии: [справочник по триботехнике] /Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. - Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. - С. 324-333.
27. Долгоносков Б.М. Закономерности гидролиза и коагуляции солей алюминия на начальной стадии смешения растворов/ Б.М. Долгоносков // Теор. основы хим. Технологии. - 2005. - Вып. 39, № 3. - С. 282-294.

REFERENCES

1. Bouden K. *Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnykh vod* [Physical oceanography of sea-side water]. Moscow, 1988. 324 p.
2. Ghordeev V.V. *Rechnoi stok v okean i cherty ego geohimii* [River runoff into the ocean and features of its Geochemistry]. Moscow, 1983. 160 p.
3. Shulejkin V.V. : *Fizika morja* [Physics of the sea]. Moscow; 1968 1083 p.
4. Fedorov K.N. *Fizicheskaja priroda i struktura okeanicheskikh frontov* [Physical nature and structure of oceanic fronts]. Leningrad, 1983. 296 p.
5. Roberts P.J. R., Webster D. *Turbulent diffusion. Environmental fluid mechanics — Theories and Application*. Reston: ASCE Press, 2002. 467 p.
6. *Gidrometeorologija i gidrohimiya morej SSSR. T.1, Barencevo more. Vyp.2. Gidrohimicheskie uslovija i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoy produktivnosti* [Hydrometeorology and hydrochemistry of USSR seas. Vol.1, the Barents Sea. Iss.2. Hydrochemical conditions and oceanographic basis for the formation of biological productivity]. Leningrad, 1992. 182 p.
7. Dolgoplova E.N., Isupova M.V. *Vodnye resursy- Water resources*, 2010, vol. 33, no. 3, pp. 274–291.
8. Vernadskij V.Y. *Istorija mineralov zemnoj kory. T.2. Istorija prirodnyh vod: Izbrannye sochineniya, T. IV, Kn.2* [The history of mineral crust. Vol.2. History of natural waters: Selected Writings, Vol.IV, Part.2.]. Moscow, 1960. pp. 7-538.
9. Lisitsyn A.P. *Ledovaja sedymentacija v morjakh y okeanakh* [Ice sedimentation in seas and oceans]. Moscow, 1994. 450 p.
10. Emelianov G.M. *The Barrier Zones in the Ocean*. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 636 p.
11. Zlobyn A., Njanyshkene V., Putyncev N. *Ekosystemy vodoroslej v izmenjajushhykh sredy obytanija (Teorija, eksperiment, predpolozhenija)* [Seagrass ecosystems in a changing environment (theory, experiment, hypothesis)]. Vilnus, 1987. 296 p.
12. Bardan S.I. *Materialy Mezhd. nauch. conf. «Sovremennye klimaticheskie i ekosistemnye protsessy v uязvymykh prirodnykh zonakh» (g. Rostov-na-Donu, 5-8 sentyabrya 2006 g.)* [Proc. Int. Scientific Conf. "Modern climate and ecosystem processes in vulnerable natural areas" (Rostov-on-Don, September 5-8, 2006)]. Rostov-na-Donu: YuNTs RAN Publ., 2006, pp. 22-25. (In Russian).
13. Bardan S.I. *Materialy Mezhd.nauch. conf «Priroda morskoy Arktiki: sovremennye vyzovy i rol' nauki» (g. Murmansk, 10-12 marta 2010 g.)* [Abstracts. Rep. Int. Scientific Conf. "Nature Marine Arctic: current challenges and the role of science" (Murmansk, 10-12 March 2010)]. Apatity: KNC RAN, 2010. pp. 24-27. (In Russian).
14. Bardan S.I. *Materialy Mezhd.nauch.conf. «Izuchenie i osvoenie morskikh i nazemnyh jekosistem v uslovijah arkticheskogo i aridnogo*

- klimata»* (g Rostov-na-Donu, 6–10 ijunja 2011 g) [Research and development of marine and terrestrial ecosystems in arctic and arid climate: Proc. Int. Scientific. Conf. (Rostov-on-Don, 6-10.06.2011)]. Rostov-on-Donu: JuNC RAN, 2011. pp. 20-24. (In Russian).
15. Bardan S.I., Serbov N.G. *Ukr. gidrometeorol. ž.– Ukrainian hydro-meteorological journal*, 2011, no 9, pp. 210-219. (In Russian).
16. Pereljman A.I. *Izuchaja geohimiju (O metodologii nauki)* [Studying the geochemistry ... (About the methodology of science)]. Moscow, 1987. 152 p.
17. Bardan S.I. Yshkulova T.Gh. *Izv. RAN. Ser. Geograf.- Proceedings of the Russian Academy of Sciences, Geography Series*, 2010, no 4, pp. 90–100. (In Russian).
18. Bardan S.I., Korneeva Gh.A. *Materialy Mezhd. nauch. conf. «Pryroda shel'fa i arkhipelagov Evropejskoj Arktyky» (g. Murmansk, 20-23 oktjabrja 2010 g.)* [Nature shelf and archipelagos of the European Arctic: Proceedings of Intern. Scientific. Conf. (Murmansk, October 27-30, 2010)]. Murmansk, 2010. pp. 18-25. (In Russian).
19. Dolghonosov B.M. *Nelinejnaja dinamika jekologicheskikh i gidrologicheskikh processov* [Nonlinear dynamics of ecological and hydrological processes]. Moscow, 2009. 440 p.
20. Zubov N.N. *Morskie vody i l'dy* [Sea water and ice]. Moscow, 1938. 453 p.
21. Drummond I.T., Munch W. Turbulent stretching of line and surface elements. *J. Fluid Mech.*, 1990, vol. 215, pp. 45-59.
22. Muzzio F.J., Ottino J.M. Dynamics of a lamellar system with diffusion and reaction: Scaling analysis and global kinetics. *Phys. Rev.*, 1989, A 40 (12), pp. 7182–7192.
23. Ottino J.M., Rantz W.E., Macosko C.W. A lamellar model for analysis of liquid—liquid mixing. *Chem.Eng.Sci.*, 1979, vol.34, pp. 877.
24. *SBE 19plus SEACAT PROFILER. User Manual. Version 012.* Bellevue, Washington, DC, 2005. 137 p.
25. Rantz W.E. *Fluid mechanical mixing – lamellar description. Mixing of Liquids by Mechanical Agitation.* New York: Gordon and Breach, 1985. 15 p. (Eds: Ulbricht J.J., Patterson G.K.).
26. Braun E.D., Evdokymov Ju.A., Chychynadze A.V. *Teorija modelirovanija i vozmozhnosti ee primenenija v tribologii: spravochnik po tribotekhnike.* T. 1. Teoreticheskie osnovy [Theory of modeling and the possibility of its application in tribology: reference for tribotechnology. Vol.1. Teoretical foundations]. Moscow, 1989. pp. 324-333.
27. Dolghonosov B.M. *Teor. Osnovy Him. Tehnologii.- Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2005, vol. 39. no. 3. pp. 282-294. (In Russian).

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СТІЙКОСТІ СЛОЇСТИХ СТРУКТУР ОБЛАСТІ РІКА-МОРЕ (НА ПРИКЛАДІ КОЛЬСЬКОЇ ЗАТОКИ)

С.І. Бардан¹, канд.біол.н.,
Б.М. Долгонос², д-р техн. н. ,
М.Г. Сербов³, канд. геогр. н.

¹ Мурманський морський біологічний інститут,,
вул. Владимирская, 17, 183010, Мурманськ, Росія, bardan@gmail.com,
²Інститут водних проблем,
вул. Губіна, 3, 101000, Москва, Росія, borismd@aqu.laser.ru,
³Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, serbov@odeku.edu.ua

Розглядаються питання переносу розчинених солей в зоні зміщення ріка-море на початкових стадіях зміщення. З використанням рівняння конвективно-дифузійного переносу домішок зі змінним коефіцієнтом дифузії, виконаний аналіз процесів для межі поверхні розділу розчинів. На підставі аналітичного рішення встановлено, що градієнтні мікро течії поперек осі подовження створюють двосторонній прошарок гідродинамічного замкнутого шару з ефектом блокування дифузійного перенесення іонів, що сприяє збереженню і стійкості слоїстих структур. Представлені результати натурних вимірювань для Кольської затоки, які підтверджують теоретичні висновки авторів. Ламелярна структура формується в зонах початкового контакту вод різного генезису, звідки виходить стійкий пучок ізогаліни 10-30‰, який розповсюджується уздовж шару з ізогаліною 24,7‰, розширюючись з інтенсивним сповільненням при стійкому куті нахилу цієї границі розділу області ріка-море.

Ключові слова: область ріка-море, слоїсті структури, конвективно-дифузійний переніс, гальмування дифузійного переносу, гідродинамічний замикаючий шар, фрактальний рельєф

**PHYSICAL FUNDAMENTAL OF LAYERED STRUCTURE STABILITY OF RIVER-SEA REGION
(ON THE EXAMPLE OF THE KOLA BAY)**

S.I. Bardan¹, Candidate of Biology Science,
B.M. Dolgonosov², Doctor of Technical Sciences, ,
N.G. Serbov³, candidate of Science Geografichnyh.

¹ Murmanskyy morskoy biologichnyy institute, st. Vladimirsky, 17, 183010, Murmansk, , Russian Federation , bardan@gmail.com,

² Institute of Water Problems, st. Gybina, 3, 101000, Moscow, Russian Federation, borismd@aqua.laser.ru,

³ Odessa State Environmental University, st. Lvovsky, 15, 65016, Odessa, Ukraine, serbov@odeku.edu.ua

Introduction. The process of transfer of dissolved salts in the mixing zone of river-sea in the early stages of mixing. Using the equation of convection-diffusion of impurity transport using variable coefficients of diffusion processes for the analysis of neighborhoods interfaces solutions. The analytical description and modeling of the processes and to assess their impact on the various components of the ecosystem.

The experimental data. We used materials of field observations in the areas of water mixing Kola Bay total length of over 60 km. and the period of renovation of water in the mixing zone, depending on the season at 3-10 days. The results of measurements of the hydrophysical parameters in Kola Bay are presented according to the 25 stations separately for spring and autumn seasons, with a total of more than 5600 field observations.

Results. On the basis of the analytical solution of the problem set that microcurrents gradient across the axis of elongation of form bi-layer hydrodynamic barrier layer, with the effect of blocking the diffusion of ion transport, which contributes to the conservation and sustainability of the layered structures. The results of field measurements for the Kola Bay, confirming the theoretical conclusions. Lamellar structure is formed in the areas of initial contact treatment of various origins, comes from a steady beam isohaline 10-33 ‰, which spreads along the fiber with isohaline 24,7 ‰, extending the strong deceleration at a steady angle of inclination of the border section area of river-sea.

Conclusions. The theoretical conclusions about the formation of a special layer at the boundaries of the mixing zone, the physical effect of blocking ion transport and accelerates the heat transfer through the boundary between fresh and marine waters. Modeling of pollutant transport model for lamellar. Various models of formation of the layered structure in contact marine and fresh waters with different ionic composition.

Keywords: river-sea mixing zone, lamellar structure, convective-diffusion transfer, solution interface stretching, effect of restraining diffusion, fractal scale-invariant relief.

Дата первого представления.: **04.08.2015**

Дата поступления окончательной версии : **11.09.2015**

Дата опубликования статьи: **26.11.2015**