

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА РОССИИ ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОИН)

На правах рукописи

Ефимова Людмила Евгеньевна

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЕВОГО СОСТАВА И
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ
РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД В БЕЛОМ МОРЕ

25.00.28. – Океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва - 2005



Работа выполнена в Государственном океанографическом институте Росгидромета.

Научный руководитель:

Кандидат географических наук,
старший научный сотрудник

А.Г. Цыцарин

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук,
профессор

В.В. Сапожников

Кандидат географических наук,
старший научный сотрудник

А.В. Полякова

Ведущая организация:

Институт водных проблем РАН

Защита состоится « 22 » декабря 2005 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета К.327.007.001 в Государственном океанографическом институте по адресу: 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного океанографического института.

Автореферат разослан « 21 » ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

 Н.В. Жохова

2006-4
26979

2248064
3

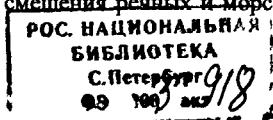
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Химический состав вод Белого моря определяется взаимодействием материкового стока и вод Баренцева моря. В Белое море впадают такие крупные реки, как Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь, Выг. Это приводит к формированию обширных зон смешения речных и морских вод. Устьевые области рек, включая дельты и устьевое взморье, где происходит взаимодействие речных и морских вод, представляют собой комплексные седиментационные, геохимические и гидробиологические барьеры, на которых задерживаются многие химические вещества, мигрирующие как в растворенном, так и во взвешенном состоянии.

Зонам смешения речных и морских вод присуща значительная пространственно-временная изменчивость количественных характеристик ионного стока и стока биогенных веществ. Растворенные и взвешенные соединения биогенных элементов - основа продукционных процессов. Согласно последним исследованиям [Максимова, 2004], Белое море может быть отнесено к водоемам мезотрофного типа. Однако, увеличение потоков биогенных веществ, связанное с хозяйственной деятельностью на водосборе (широким использованием минеральных удобрений в сельском хозяйстве, поступлением коммунально-бытовых и промышленных стоков) сопровождается эвтрофированием вод, оказывающим негативное влияние на экологическое состояние устьевых и прибрежных экосистем.

Исследование зон смешения речных и морских вод в Белом море важно не только с научной и практической, но и с методической точки зрения. Солевой состав беломорских вод отличается от океанского. Опресняющее влияние речного стока проявляется в том, что в зонах смешения речных и морских вод в Белом море нарушается квазипостоянство межйонных соотношений. Поэтому расчет солёности беломорских вод по содержанию одного из ионов - хлора, либо по относительной электропроводимости согласно международным уравнениям, предложенным ЮНЕСКО для океанских вод, не всегда может обеспечить надежный результат. Для повышения точности расчетов солёности воды и их соответствия современной метрологической базе, необходимо разработать новый алгоритм вычисления солёности по относительной электропроводимости для вод Белого моря.

Цель исследования. Цель работы - определение основных пространственно-временных закономерностей распределения растворенных компонентов солевого состава и биогенных элементов в зоне смешения речных и морских вод и получение



комплексного представления о гидрохимической структуре зон смешения речных и морских вод в Белом море.

Задачи работы:

- изучить пространственно-временную изменчивость солевого состава и концентраций биогенных элементов в зонах смешения речных и беломорских вод;
- определить основные факторы, влияющие на поведение ионов солевого состава и биогенных элементов при контакте речных и беломорских вод;
- оценить роль геохимического барьера река-море в формировании гидрохимических характеристик прибрежных акваторий Белого моря;
- вывести отвечающее современным метрологическим требованиям уравнение для определения солёности воды по величине относительной электропроводимости в зоне смешения речных вод и вод Белого моря.

Защищаемые положения:

- Распределение большинства ионов основного солевого состава в зоне смешения речных и морских вод соответствует консервативному типу поведения химических компонентов и определяется, главным образом, процессами динамического смешения. Для биогенных элементов, напротив, характерны процессы, приводящие к поступлению или удалению их из раствора.
- Колебания речного стока – основной фактор в формировании сезонных изменений солевого состава вод зоны смешения. Короткопериодная изменчивость солевого состава вод определяется приливными явлениями.
- В барьерной зоне водно-солевая система, соответствующая началу трансформации ионного состава вод, постепенно переходит к состоянию собственно вод моря.
- Гипотеза о квазипостоянстве межионных соотношений не всегда может быть применена к водам Белого моря, так как их солевой состав подвержен большей изменчивости, чем солевой состав вод океана. Для уменьшения ошибки при определении солёности воды в зоне смешения речных и беломорских вод рекомендуется использовать в качестве базового параметра расчетов относительную электропроводимость, а не концентрацию одного из ионов.

Научная новизна. На основе наиболее полного массива собственных и литературных данных получено комплексное представление о сезонной и пространственной изменчивости солевого состава и содержания биогенных элементов в воде зоны смешения речных и беломорских вод. Численно описаны соотношения этих

компонентов в широком диапазоне солёности воды. Определены границы применимости гипотезы о квазипостоянстве солевого состава воды для Белого моря. Впервые установлены приоритетные факторы, регулирующие поведские кремния и растворенных форм фосфора в зоне смешения речных и беломорских вод. Впервые получено отвечающее современной метрологической базе и совместимое с Международным уравнением ШПС-78 уравнение для вычисления солёности воды в зоне смешения в Белом море по величине относительной электропроводности

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть применены для расчета солёности воды и содержания основных компонентов солевого состава зоны смешения в Белом море. Количественные характеристики трансформации стока биогенных элементов могут быть использованы для прогноза качества воды и состояния экосистем устьевых областей рек и прибрежных вод, а также для глобальных оценок потерь биогенных элементов на границе раздела река-море.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований были представлены на научных семинарах Лаборатории гидрохимии эпиконтинентальных морей ГОИНа в 2000-2001 гг., XIV Международной школе морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, ИОАН, 2001), Международной конференции «Экология Северных территорий России» (Архангельск, 2002), V Международной конференции «Взаимодействие суша-океан в Российской Арктике» (Москва, ИОАН, 2002), Международной конференции «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, 2004), Международной конференции «Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic», LOIRA (Москва, 2004).

Фактический материал, личный вклад автора. В работе использованы материалы, полученные в 1999-2003 гг. в совместных экспедициях Государственного океанографического института, географического факультета МГУ и Института экологических проблем Севера УРО РАН, четыре из которых были подготовлены и проведены автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 статей и тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 144 страницах, включая 20 таблиц, 43 рисунка и список литературы из 198 наименований, включающий 62 зарубежных источника.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 99-05-64085) и Минпромнауки РФ по ФГП «Мировой океан».

Автор глубоко признателен д.г.н. В.Н. Михайлову, д.г.-м.н. В.С. Савенко, к.г.н. А.В. Савенко и к.г.н. В.С. Архипкину за предоставленные консультации по работе, а также к.г.н. Л.Э. Скибинскому, О.Ю. Моревой, М.Ю. Таптыгину, принимавшим участие в совместных исследованиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор исследований основного солевого состава и содержания биогенных элементов в устьевых областях рек, впадающих в Белое море и в воде самого моря. В главе также дана краткая физико-географическая характеристика района исследования, рассмотрен гидрологический и гидрохимический режим вод Белого моря в целом и вод материкового стока, описана методика выполненных работ.

Исследования солевого состава и солёности вод Белого моря (раздел 1.1) начаты на рубеже 19-20 веков экспедицией под руководством Н.М.Книповича. В 1939 г. солевой состав вод Белого моря был изучен А.А. Мусипой и П.П. Воронковым. На фоне относительного постоянства солевого состава и его близости к водам океана отмечены некоторые региональные различия межиионных соотношений, связанные с влиянием речного стока. В конце 50-х годов 20 века впервые были выполнены комплексные исследования всей акватории Белого моря, включая определение всех основных форм биогенных и органических веществ, и рассчитан их баланс, позволивший оценить роль различных факторов в формировании гидрохимического режима моря [Максимова, 1959. 1960. 1961]. В середине 70-х годов 20 века СУГМС начаты систематические сезонные исследования гидрохимического режима Белого моря по общегосударственной программе наблюдений и контроля состояния окружающей среды. Тем не менее, в настоящее время практически отсутствуют сведения о зимнем гидрохимическом режиме зон смешения речных и беломорских вод, поведении ионов солевого состава и биогенных элементов в ледяном покрове, слабо изучен режим биогенных элементов в устьевых областях малых рек водосбора Белого моря.

Для изучения особенностей солевого состава и электропроводимости беломорских вод в 1980-1981 гг. сотрудниками Лаборатории гидрохимии эликоонтинентальных морей ГОИНа в распресинных районах Белого моря были отобраны и проанализированы пробы воды, характеризующие разные стадии смешения речных и морских вод. В результате была получена связь между хлорностью и относительной электропроводимостью, а затем по формуле связи хлорности с соленостью воды, получена формула связи солености с относительной электропроводимостью для беломорских вод [Друмева, 1984]. Таким образом, вплоть до настоящего времени соленость вод Белого моря фактически определялась через хлорность, а не через электропроводимость. Это понижало качество измерений, поскольку хлорность показывает лишь концентрацию одного из ионов, а относительная электропроводимость является интегральной характеристикой. Кроме того, существующие таблицы для расчета солености по электропроводимости [1984] выполнены только для температуры 20° С и не позволяют проводить вычисления в более широком температурном диапазоне.

Использование современных высокоточных солемеров вызвало необходимость проведения комплекса работ по получению нового уравнения для пересчета электропроводимости в соленость. При выполнении этой задачи автором настоящей работы систематизированы и расширены знания о солевом составе вод зоны смешения в Белом море, особое внимание уделено гидрохимическим особенностям устьевых областей рек.

В разделе 1.2 представлена краткая физико-географическая характеристика Белого моря. Морфологические особенности и географическое положение Белого моря влияют на протекающие в нем крупномасштабные динамические процессы, формирующие систему циркуляции его вод, гидрологический и гидрохимический режим отдельных районов.

В разделе 1.3 рассмотрены морфометрические особенности и основные гидролого-гидрохимические характеристики устьевых областей рек Северная Двина, Онега, Пурнема и Ямца. Представлены новые данные о водном и солевом стоке этих рек [Gogina, Efimova et al., 2004], рассмотрена внутригодовая и межгодовая изменчивость стока. В период интенсивного антропогенного воздействия (1970-2000гг.) заметно возросла минерализация вод Северной Двины и Онеги (на 14% и 7% соответственно) по

сравнению с минерализацией в предыдущий фоновый период. Ионный сток в Двинский и Онежский заливы увеличился соответственно на 17,5 % и 6,5 %.

Материалом для диссертационной работы (1.4) послужили результаты анализа проб воды, снега и льда, отобранных в 1999-2003 гг. в экспедициях Государственного океанографического института, географического факультета МГУ и Института экологических проблем Севера УРО РАН. Комплексные гидролого-гидрохимические съемки устьевых областей Северной Двины, Онеги, малых рек Онежского полуострова и прибрежных акваторий Белого моря охватывали разные фазы водного режима рек: зимнюю межень, весеннее половодье, летне-осенний период. Учитывалась также приливная динамика. Было проанализировано около 500 проб воды, снега и льда, в них проведено 5511 определений различных химических элементов, большинство из которых выполнено лично автором. Полученный массив данных по солевому составу был дополнен литературными и архивными материалами.

Собственные определения относительной электропроводимости производились на высокоточном солемере AUTOSOL - 8400 при температурах 15, 18, 21, 24, 27, 30 °С.

Исследования химического состава воды выполнялись по стандартным методикам. В работе дана оценка точности проведенных аналитических измерений.

Во второй главе представлены современные представления о гидрологической структуре и районировании зон смешения речных и морских вод, рассмотрены основные процессы, контролирующие миграцию растворенных и взвешенных веществ в зоне смешения речных и морских вод.

В пределах зоны смешения речных и морских вод выделяется зона наиболее активного взаимодействия двух водных масс, с максимальными горизонтальными градиентами гидролого-гидрохимических характеристик. В геохимии ее принято называть барьерной зоной, «которая характеризуется резким изменением миграционной способности элементов, определяемым механическими, физико-химическими и биохимическими факторами» [Перельман, 1969].

В результате трансформации химического состава вод в зоне смешения реальное поступление растворенных и взвешенных форм химических веществ в открытое море может существенно отличаться от расчетных значений, полученных по данным о концептрациях соответствующих компонентов в речной воде и величинах водного стока

В зависимости от степени вовлечения в химические и биохимические реакции поведение химических компонентов может быть как консервативным, так и неконсервативным [Гордеев, 1983; Михайлов и др., 1997; Савенко, 2003]. В случае консервативного поведения компонента изменение его концентрации обусловлено процессами динамического смешения речных и морских вод. В качестве косвенной характеристики консервативности обычно используют концентрацию хлоридов [Liss, 1976; Гордеев, 1983], для которых характерно слабое участие в химических и биологических процессах. Использование солёности (или фактической суммы солей) в качестве консервативного показателя, некорректно, поскольку другие компоненты основного солевого состава не являются полностью химически и биологически инертными. При смешении двух водных масс между концентрацией хлорида и любого консервативного компонента (i) должна наблюдаться линейная зависимость:

$$[i] = a + b[Cl], \quad (1)$$

Отклонения концентрации компонента (i) от этой зависимости свидетельствует о его неконсервативном поведении, вызванном как внутриводосными процессами, так и обменом на границах раздела вода-дно, вода-воздух.

Третья глава посвящена детальному описанию солевого состава вод Белого моря в диапазоне солёности от 0 до 25 ‰ и его пространственно-временной изменчивости. В этой главе определены и детально проанализированы особенности вод Белого моря по сравнению с водами океана и других морей, а также предложен совместимый с Международными уравнениями ШПС-78 полином для расчета солёности воды по измеренной ее относительной электропроводимости.

В разделе 3.1 представлен подробный анализ распределения главных ионов солевого состава, рассмотрены их абсолютные (г/кг) и относительные (%-эквивалентные) концентрации. Результаты проведенных исследований показали, что поведение основных солеобразующих ионов в зоне смешения речных и морских вод в Белом море формально соответствует консервативному типу и может быть описано линейными или близкими к линейным зависимостями между концентрациями изучаемых компонентов и содержанием хлоридов (табл.1), миграция которых определяется исключительно процессом динамического смешения водных масс.

Сравнение расчетов по формулам, предложенным автором и формулам, полученным Л.Б. Друмевой [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991],

показало, что большие расхождения относятся к расчетам при концентрации хлоридов ниже 3 г/кг, минимальные – при концентрациях хлоридов 5-10 г/кг

Таблица 1. Параметры зависимостей между концентрациями ионов солевого состава и содержанием хлоридов в зонах смешения речных и беломорских вод

Период наблюдений	Параметры регрессионных зависимостей [i, г/кг] = a + b [Cl, г/кг]					
	a	b	г коэффициент корреляции	п число проб	Da дисперсия «а»	D b дисперсия «b»
$i = \text{HCO}_3^-$						
Весна	0,042	0,055	0,955	90	0,0087	0,001
Зима	0,181	-0,031	0,937	122	0,034	0,005
$i = \text{SO}_4^{2-}$						
Весна	0,026	0,150	0,989	95	0,0021	0,0040
Лето, осень, зима	0,089	0,128	0,981	555	0,0030	0,0046
$i = \text{Ca}^{2+}$						
Весна	0,018	0,015	0,994	93	0,0009	0,0002
Лето, осень, зима	0,035	0,017	0,991	543	0,0014	0,0002
$i = \text{Mg}^{2+}$						
Весна	0,002	0,068	0,990	95	0,0036	0,0008
Лето, осень, зима	0,014	0,065	0,996	554	0,0011	0,0002
$i = \text{Na}^+$						
Весна	0,005	0,554	1,000	95	0,0013	0,0027
Лето, осень, зима	0,045	0,554	1,000	555	0,0154	0,0022
$i = \text{K}^+$						
Весна	0,001	0,022	0,995	55	0,0008	0,0003
Лето, осень	0,002	0,018	0,996	410	0,0016	0,0002
$i = \Sigma \text{солей (фактическая сумма солей)*}$						
Весна	0,0918	1,8111	0,999	55	0,026	0,0013
Лето, осень	0,259	1,7877	1,000	502	0,047	0,0049

*Фактическая сумма солей (г/кг) может несколько отличаться от величины солёности (до 0,45 %) [Алекин, 1970].

Непосредственно межкатионных соотношений, представление о которых дают хлорные коэффициенты рассматриваемых ионов (табл. 2), подтверждает, что метод определения солёности морской воды по концентрации хлор-иона для вод устьевых и прибрежных областей Белого моря, по сути, неприменим.

В результате совместного анализа полученных зависимостей и величин хлорных коэффициентов в зоне смешения речных и беломорских вод можно выделить следующие этапы трансформации ионного состава вод:

- Вследствие нарушения состояния речной водно-солевой системы при смешении речных и морских вод наиболее резкие изменения межкатионных соотношений

наблюдаются в диапазоне суммы солей 0,5-2,0 г/кг. Для этого диапазона характерны заметные сезонные различия всех компонентов солевого состава;

- В диапазоне суммы солей 2,0-5,0 г/кг происходит подстройка ионного состава вод зоны смешения к водам собственно моря. Наблюдается более медленное снижение значений хлорного коэффициента, сохраняются небольшие сезонные различия;
- В водах со значними суммы солей более 5 г/кг наблюдается постепенное увеличение доли морских ионов. При сумме солей 10-11 г/кг изменения солевого состава свидетельствуют о переходе к морскому типу вод.

Таблица 2 Хлорные коэффициенты солеобразующих ионов зоны смешения речных и беломорских вод для разных гидрологических сезонов

Фактическая сумма солей, г/кг	HCO ₃	Ca	SO ₄	Mg	Na	K
Весна						
0,5	0,20	0,08	0,9	0,084	0,1	0,034
1,0	0,8	0,045	0,25	0,065	0,18	0,028
2,0	0,3	0,035	0,2	0,065	0,48	0,023
4,0	0,02	0,03	0,18	0,064	0,55	0,021
5,0	0,02	0,025	0,16	0,070	0,55	0,019
15,0	0,0009	0,02	0,15	0,070	0,55	0,020
лето						
0,5	0,8	0,27	0,4	0,11	0,20	0,035
1,0	0,33	0,11	0,34	0,09	0,27	0,025
2,0	0,13	0,07	0,2	0,075	0,5	0,024
4,0	0,04	0,045	0,18	0,072	0,54	0,021
5,0	0,02	0,035	0,14	0,071	0,54	0,017
15,0	0,008	0,022	0,13	0,070	0,56	0,016
осень						
0,5	0,9	0,47	0,5	0,08	0,19	0,036
1,0	0,25	0,096	0,28	0,82	0,25	-
2,0	0,14	0,05	0,21	0,068	0,54	0,025
4,0	0,05	0,045	0,23	0,069	0,55	-
5,0	0,02	0,035	0,12	0,072	0,55	0,020
15,0	0,001	0,02	0,15	0,07	0,55	0,018
зима						
0,5	2,0	0,52	1,2	-	0,23	0,037
1,0	0,3	0,12	-	--	0,29	0,029
2,0	0,16	0,07	0,23	-	0,55	0,025
4,0	0,04	0,043	0,19	-	0,55	0,022
5,0	0,02	0,036	0,13	-	0,55	0,019
15,0	0,008	0,022	0,14	0,07	0,56	0,018
Мировой океан						
35,0	0,0074	0,021	0,14	0,067	0,556	0,02

Реки Северная Двина и Онега, впадающие в Белое море, формируют зоны смешения в Двинском и Онежском заливах (3.2.1). В воде заливов содержание ионов материкового происхождения значительно выше, чем в других частях Белого моря. Максимальной изменчивостью характеризуется солевой состав вод Двинского залива, в воде которого при содержании хлоридов 0,5 г/кг относительная концентрация гидрокарбонатов в эквивалентной форме в 15 раз выше, чем в водах Бассейна. Также в водах заливов в 2 и более раз повышено содержание ионов кальция при пониженном относительном содержании ионов натрия и хлора.

Среди факторов, определяющих сезонную изменчивость, структуру и динамику зоны смешения, основным является внутригодовая изменчивость речного стока. Район больших вертикальных и горизонтальных градиентов ионов солевого состава и солености вод (соответствующей фактической сумме солей) при увеличенном стоке располагается значительно дальше в море, чем при пониженном стоке (рис.1), а изменение его положения у поверхности приводит к изменению положения у дна. В период весеннего половодья в поверхностном слое Двинского залива в зоне распространения основного потока речных вод соленость равна 1 ‰ на расстоянии 40 км от морского края дельты. При этом у дна данная характеристика достигает величины 30 ‰. Горизонтальные градиенты солености в поверхностном слое составляют около 4 ‰ на 1 км. Вертикальные градиенты суммы солей в период половодья особенно велики между слоем скачка и придонными водами (3,5-4,0 ‰ на 1м).

Уменьшение речного стока способствует перемещению зоны смешения в сторону берега. В период пониженного стока в летнюю и зимнюю межень трансформация вод Северной Двины начинается почти в вершине дельты (рис.2).

Приливные явления оказывают доминирующее влияние на кратковременную изменчивость пространственного распределения суммы солей и компонентов солевого состава. Колебания солености могут достигать в придонном горизонте зоны смешения 8-10 ‰. Отмечена следующая закономерность – чем больше величина прилива, тем протяженнее становится зона максимальных пространственных градиентов с одновременным их уменьшением [Мискевич, 2005]. Наличие ледяного покрова тормозит распространение приливной волны, в результате чего в поверхностном горизонте в сторону моря сильнее распространяется речная вода, а стратификация вод в зоне смешения особенно усиливается в фазу отлива.

Глубина, м.

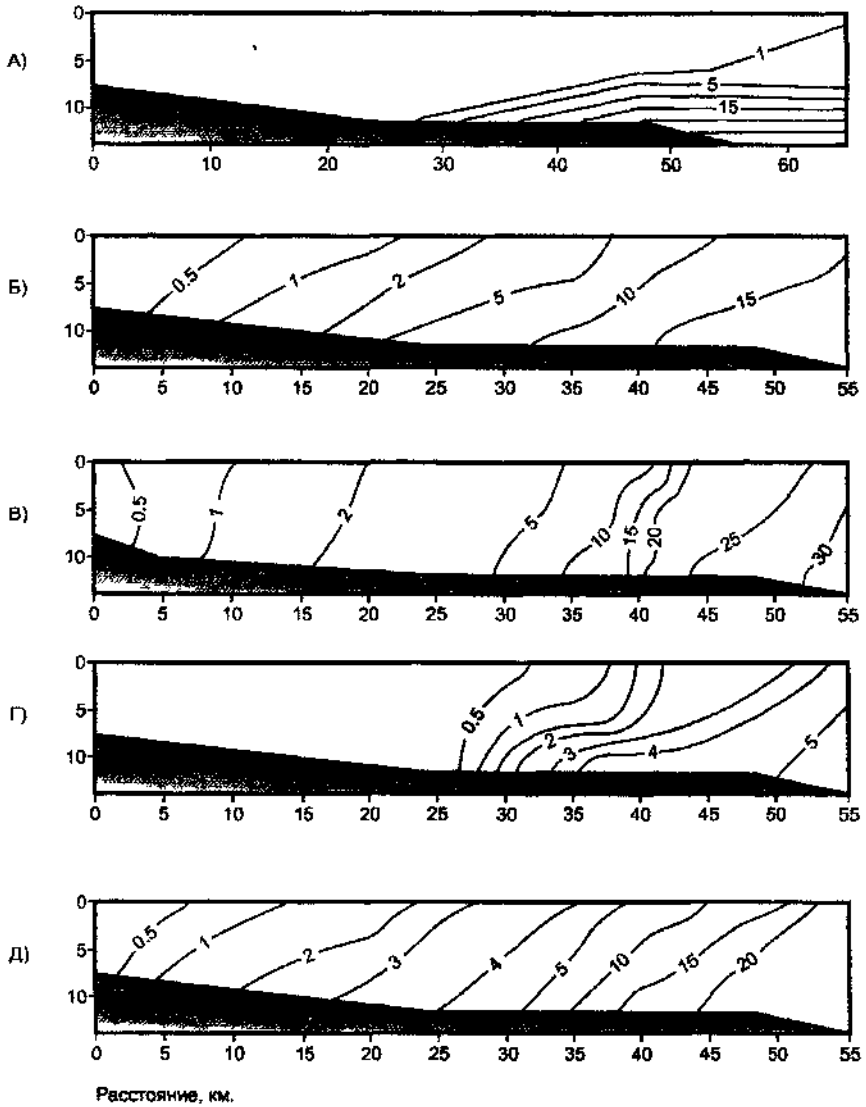


Рис. 2. Распределение солености в зоне смешения дельных и беломорских вод в 2001 году на разрезе: вершина дельты Северной Двины - траверса Куйского маяка
 а) весеннее половодье (23 мая, $Q=11250$ м³/с, отлив);
 б) летняя межень (07 августа, $Q=1302$ м³/с, отлив);
 в) летняя межень (06 августа, $Q=1318$ м³/с, прилив);
 г) осенняя межень (20 октября, $Q=1764$ м³/с, прилив);
 д) зимняя межень (18 марта, $Q=695$ м³/с, прилив).

В осенний период конвективное перемешивание приводит к уменьшению вертикальных градиентов концентраций всех гидрохимических характеристик. Распределение их в придонном горизонте практически повторяет распределение на поверхности.

Сезонная динамика зоны смешения вод р. Онеги с водами Белого моря также связана с изменчивостью водного стока, а короткопериодная динамика - с приливными явлениями. Степификация зоны смешения онежских и беломорских вод определяется такими факторами как: рельеф дна устьевой области, способствующий быстрому загуханию приливной волны (в 15 км от устьевого створа), и несколько повышенная соленость хорошо перемешанных вод устьевого изморья. Водный сток р. Онеги почти в 7 раз меньше стока р. Северной Двины, поэтому в период весеннего половодья речные воды располагаются на расстоянии около 40 км от вершины устьевой области (12 км от устьевого створа), где и формируется зона максимальных градиентов солености. Под влиянием приливных течений происходит изменение положения и структуры зоны смешения. В фазу прилива при расходе воды р. Онеги (с. Порог) $506 \text{ м}^3/\text{с}$ горизонтальные градиенты поверхностной солености превышали $4,5 \text{ ‰}$ на 1 км, а при том же расходе воды в фазу отлива - были в 2,5 раза меньше. Вертикальные градиенты солености составляли около 4 ‰ на 1 м.

В устьях малых рек Пурнема и Лямца, впадающих в Онежский залив, при контакте ультрапресных вод с морскими, градиенты солености определяют структуру зон смешения в течение всего года. Сезонная изменчивость зон смешения определяется колебаниями речного стока и незначительна вследствие малых расходов воды (среднемноголетний расход не более $7 \text{ м}^3/\text{с}$). Кратковременные изменения пространственного положения зон смешения зависят от фазы и величины прилива. За приливный цикл они могут сдвигаться на 200-300 м.

Важным фактором формирования сезонной изменчивости солевого состава и солености в зоне смешения речных и беломорских вод является наличие ледяного покрова (3.2.2). Для зоны смешения речных и беломорских вод справедливо утверждение об увеличении солености льда с увеличением суммы солей в воде, из которой образовался лед. Как было показано ранее, там, где сумма солей в воде равна 1,0 - 1,5 г/кг, происходит резкая трансформация солевого состава воды, которая прослеживается и в ионном составе льда. При значениях суммы солей в воде более 5 г/кг в ледяном покрове величины хлорных коэффициентов увеличиваются для ионов

морского происхождения и уменьшаются для ионов речного происхождения, достигая на ст. Мудьюг значений, характерных для льда центральной части Белого моря (например, отношение Са/Сl изменяется от 2,55 до 0,04).

В разделе 3.3 проведено сравнение солевого состава беломорских вод с водами океана и водами других арктических и южных морей России. Значения межионных соотношений на морской границе зоны смешения речных и беломорских вод обнаруживают большое сходство с аналогичными величинами, полученными для Карского моря. Наибольшее отклонение (по сравнению с водами Мирового океана и связанного с Белым морем Баренцева моря) наблюдается в отношении к хлору гидрокарбонатного иона и иона кальция, что обусловлено поступлением данных компонентов солевого состава с материковым стоком. Значение осредненного коэффициента «b» (табл. 1) для зоны смешения речных и морских вод в Белом море больше, чем в Карском и Балтийском морях.

В разделе 3.4 представлен полином для расчета солёности вод зоны смешения Белого моря по величине относительной электропроводимости. Был выбран оптимальный методический подход, позволяющий достичь совместности с Международными уравнениями ШПС-78 (ЮНЕСКО, 1981, т.36). При проведении экспериментальных исследований в качестве калибровочного раствора использована нормальная морская вода, в качестве рабочих образцов – природная беломорская вода и ее смеси, а в качестве интегральной характеристики содержания солей – фактическая сумма солей. Такой подход широко распространен в отношении водоемов с ограниченным водообменом [Миллеро, 1978].

Автором работы получено, что солёность вод зоны смешения Белого моря может быть рассчитана по относительной электропроводимости следующим образом:

$$S\text{‰} = 0,0079 - 0,2327K_{15}^{1/2} + 25,7277K_{15} + 13,4037K_{15}^{3/2} - 6,4671K_{15}^2 + 2,5604K_{15}^{5/2} \quad (2)$$

где K_{15} – отношение электропроводимости воды при 15° С и нормальном атмосферном давлении к электропроводимости раствора хлорида калия точно определенной концентрации при тех же условиях.

Для расчета солёности по относительной электропроводимости R_t , измеренной на электросолемере при температуре t и нормальном атмосферном давлении, необходимо ввести поправку dS :

$$dS = \frac{t - 15}{1 + 0,0162 (t - 15)} (0,0028 - 0,0063R_t + 0,0389 R_t^{3/2}) \quad (3)$$

Среднеквадратические отклонения солености, рассчитанной по полученному полиному, не превышают 0,025‰. При малых значениях солености относительная погрешность уравнений растет. Поэтому полученные уравнения не рекомендуется применять при солености ниже 3 ‰.

В четвертой главе анализируются закономерности миграции растворенных форм биогенных элементов в зоне смешения речных и беломорских вод. Этот анализ позволяет получить представление о направленности и интенсивности трансформации стока биогенных элементов.

В разделе 4.1 проанализированы основные процессы, влияющие на распределение биогенных компонентов в зонах смешения речных и морских вод в арктических морях. Поступление или удаление биогенных элементов связано, в первую очередь, с биологическими и физико-химическими (сорбция-десорбция) процессами, на интенсивность протекания которых оказывают влияние гидрометеорологические условия. Совместное влияние приливов и морфометрических особенностей устьевой области реки проявляется в том, что приливная волна вызывает значительное увеличение мутности устьевых вод, тем самым, с одной стороны, ослабляя процессы фотосинтеза, с другой – усиливая биохимическую трансформацию веществ на приливных маршах. Для зон смешения в арктическом бассейне весьма существенным оказывается совместное влияние приливов и ледяного покрова. Приливные движения вод приводят к образованию в ледяном покрове трещин, через которые вода поступает на лед, а при отливе, возвращается под лед, изменив свои химические свойства. В ледяном покрове при этом продолжают биохимические процессы. Характерная черта водных экосистем зон смешения речных и морских вод – присутствие солоноватоводной биоты, наряду с пресноводными и морскими видами фито- и зоопланктона. Благодаря этому в зависимости от вегетирующих в период исследований тех или иных видов фитопланктона биологическое поглощение биогенных компонентов наблюдается практически во всех диапазонах солености воды.

Проведенные автором исследования (раздел 4.2) позволили сделать вывод о том, что в зоне смешения речных и беломорских вод происходит активное вовлечение биогенных элементов в биогеохимические циклы. Максимальное содержание

растворенного кремния, валового и минерального фосфора отмечено в зимний период, когда их концентрации в 1,5 – 2 раза выше, чем в период летней межени. При этом поведение рассматриваемых биогенных элементов, при отсутствии дополнительных источников поступления, является консервативным и обусловлено исключительно процессом динамического смешения речных и морских вод, описываемое линейной зависимостью (табл.3).

Таблица 3. Сезонная изменчивость параметров зависимостей между концентрацией кремния и содержанием хлоридов в устьях Сев. Двины, Онеги и малых рек Онежского полуострова в период зимней межени

Зона смешения рек, выпадающих в Белое море	Параметры регрессионных зависимостей [i, мкг-ат/л] = a + b [Cl, г/л]					
	a	b	г коэффициент корреляции	n число проб	Da дисперсия "а"	Db дисперсия "b"
Сев. Двина	167,2	-30,03	0,980	39	0,936	0,0018
Сев. Двина (перед началом половодья)	154,1	-16,1	0,995	14	0,702	0,0023
Онега, Пурнема, Лямца	123,2	-12,02	0,992	26	0,768	0,0014

Полученные зависимости позволяют использовать кремний в зимний период как репрезентативный показатель для выделения влияния материкового стока наряду с ионами основного солевого состава (в первую очередь, с хлоридами).

Распределение валового и минерального фосфора, в зимний период также не подвержено трансформации в зонах смешения устьевых областей рек Онега, Пурнема и Лямца. В речной части зоны смешения двинских и беломорских вод (около 17 км от вершины дельты, протока Кузнечиха), наоборот, происходит обогащение водной толщи фосфором вследствие его антропогенного поступления (до 0,3 мкг-атР/мин/л и 0,85 мкг-атР/вал/л. Этот процесс наблюдался в период проведения всех зимних съемок, когда водный сток был минимальным. В придонном слое органический фосфор являлся преобладающей формой, составляя 49-57 % от валового фосфора, а в области поступления стоков 29 лесозавода его доля увеличивалась до 63 % от валового фосфора. Аналогичным образом распределялся в речной части зоны смешения и аммонийный азот. Наличие большого количества органического вещества в низовьях протоки Кузнечиха приводило к истощению запасов кислорода до 3 – 4 мг/л (20 – 30 % нас), что подтверждается данными других авторов [Бреховских и др., 2003, Мискевич, 2005].

С началом активного развития диатомовых водорослей у кромки льда биологические процессы становятся основными в трансформации стока растворенных биогенных элементов в устьях исследованных рек. В течение всего вегетационного периода с апреля по август в эвфотическом слое отмечено постепенное снижение концентраций изучаемых элементов, как на речной, так и на морской границе зоны смешения, обусловленное превышением продукции органического вещества над деструкцией.

На спаде весеннего половодья содержание кремния уменьшается в речных водах в 2-2,5 раза, его удаление составляет около 15 % от содержания в речной водной массе (рис.3).

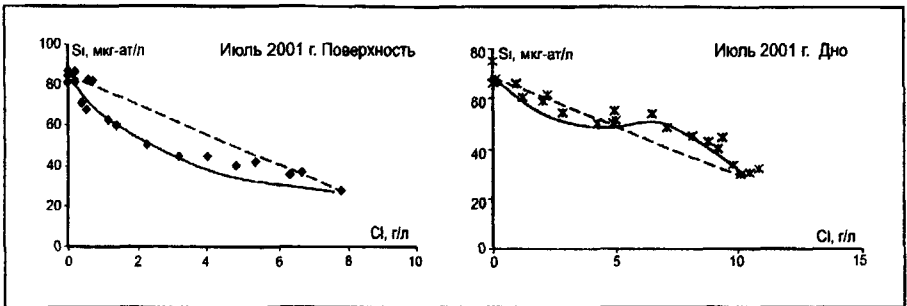


Рис. 3. Зависимость концентрации кремния от содержания хлоридов в зоне смешения вод Северной Двины и Белого моря (---- линии консервативного смешения)

Максимальное потребление минерального фосфора (20-25 %) характерно для июля-августа, и связано со сменой видового состава фитопланктона (диатомовый фитопланктон сменяется популяциями жгутиковых) [Тарасова, 2003].

В летний период, в верхнем 10-метровом слое, где наиболее интенсивны процессы фотосинтеза, подавляющая часть соединений фосфора и азота представлена органическими формами, доля которых составляет до 70 % от валового содержания этих элементов. С глубиной доля органических форм фосфора в их валовом количестве уменьшается, и под слоем скачка плотности соотношение $P_{\text{мин}}/P_{\text{орг}}$ достигает 75 %. Доля минеральных соединений азота к концу лета несколько возрастает за счет увеличения концентраций аммонийного азота.

В придонных горизонтах зоны смешения в Двинском и Онежском заливах в вегетационный период процесс удаления кремния и минерального фосфора из раствора наблюдается в основном на мелководных, хорошо прогретых участках. В придонных

горизонтах, наоборот, отмечено накопление кремния (рис.3) и минерального фосфора. Вероятнее всего, поступление этих элементов в придонные горизонты зоны смешения может происходить при взмучивании донных осадков под влиянием приливных течений. Подтверждением этого служит также значительное увеличение объемной концентрации взвеси в придонном горизонте (рис.4).

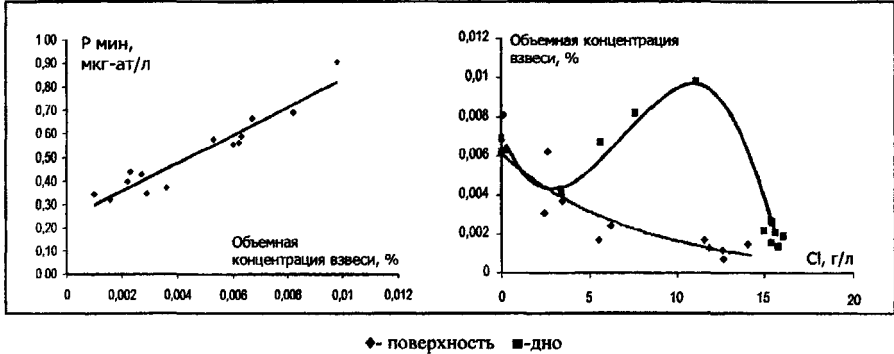


Рис. 4. Зависимость концентрации минерального фосфора от объемной концентрации взвеси в придонном слое и зависимость объемной концентрации взвеси от содержания хлоридов (август 2001 год)

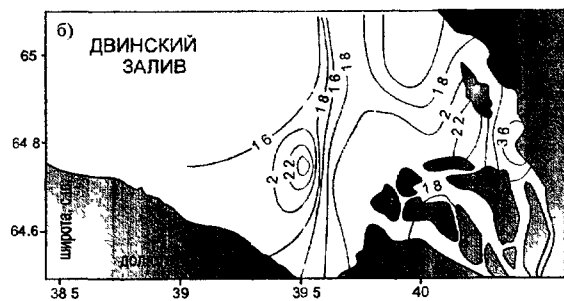
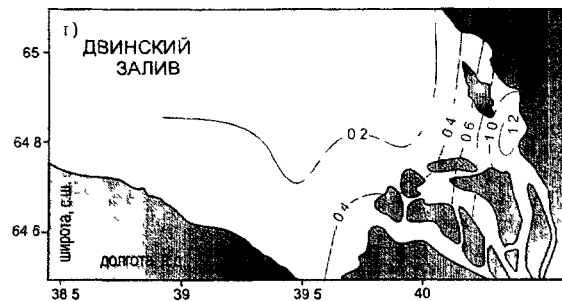
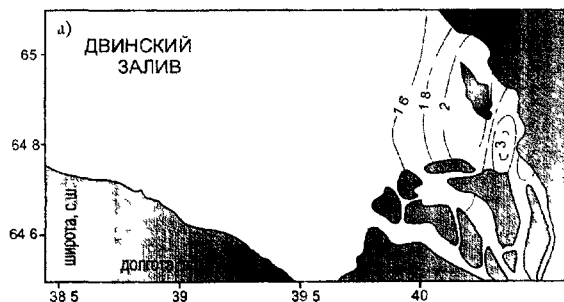
Для зоны смешения вод р. Лямцы и Белого моря в период летней межени (август 2003 г.) характерным оказалось квазиконсервативное поведение фосфора, при котором, несмотря на активно идущие биологические процессы, концентрация растворенного фосфора мало изменяется вдоль оси смешения. Подобное распределение обусловлено хорошей сбалансированностью продукционно-деструкционных процессов, о чем также свидетельствует удаление из вод в аэробных условиях нитратного азота и высокая степень фосфатазной активности, наблюдаемая в летний период в водах Белого моря [Агатова и др., 1994]. Распределение растворенных форм фосфора на мелководных участках в зоне смешения р. Пурнемы и Белого моря несколько отличается от их поведения в устьевых зонах других рассмотренных рек. Скопление на литорали большого количества органического вещества во время штормов способствует значительному обогащению вод фосфором – до 0,5 мкг-ат Р_{мин}/л и до 1,8 мкг-ат Р_{вал}/л. Наибольшие концентрации растворенного фосфора наблюдаются в придонных слоях, где он поступает в воду из разлагающегося органического вещества, оседающего на дно. Пониженные концентрации кислорода в придонном водном слое (60-65 %

насыщения) также свидетельствуют об интенсивно протекающих в благоприятных температурных условиях процессах деструкции органического вещества.

Наиболее ярко по распределению концентраций биогенных элементов биогеохимический барьер прослеживается в Двинском заливе, где в период летней межени он расположен между островами Лапоминка и Мудьюг (рис.5). В динамически активной барьерной зоне концентрируются взвеси (илистая пробка), живые организмы и отмершая органика. В этой зоне наблюдается максимальное содержание суммарного минерального - до 1,5 мкг-ат/л и валового фосфора - до 2,5 мкг-ат/л. По распределению аммонийного азота (в поверхностном и придонном горизонтах) также определяется положение геохимического барьера. Максимальные концентрации аммонийного азота и минимальные - нитратного азота связаны со значительным накоплением и последующей деструкцией органического вещества.

Осенью в зонах смешения в устьевых областях Северной Двины и Онеги отмечен рост концентраций растворенного кремния и минерального фосфора, связанный с увеличением содержания этих элементов в речной воде и затуханием процессов биологического потребления, а также наблюдается выравнивание концентраций по глубине, обусловленное конвективным перемешиванием.

Анализ сезонных изменений концентраций основных биогенных элементов в зонах смешения речных и беломорских вод позволил оценить первичную продукцию (ПП) фитопланктона за вегетационный период (от начала вегетации до конца августа 2001 года). Расчет основан на убыли содержания биогенных элементов в эвфотическом слое зоны смешения [Руководство..., 2003]. Наиболее близка к реальной величина первичной продукции, рассчитанная по убыли кремния, скорость регенерации которого невелика и не оказывает существенного влияния на его содержание. Величина первичной продукции в Двинском заливе составила 0,32-0,45 г C/(м²сут) в барьерной зоне, снижаясь к морской границе зоны смешения до 0,16-0,20 г C/(м²сут). В зоне смешения вод Онеги и Белого моря величина первичной продукции в эвфотическом слое также была невелика и колебалась от 0,13 до 0,25 г C/(м²сут). Полученные результаты согласуются с другими данными для Белого моря [Налетова и др., 1994]. Расчеты на основе стехиометрических молярных соотношений показали, что в зоне смешения двинских и беломорских вод лимитирующим первичную продукцию компонентом является минеральный азот, а в зоне смешения онежских и беломорских вод – кремний, активное потребление которого начинается в апреле еще подо льдом.



Важным интегральным показателем биогеохимической активности морей, количественно характеризующим обмен веществом на границах сред, являются коэффициенты водообмена и коэффициенты обмена веществом (в частности, биогенными элементами) [Максимова, 2004]. В представленной работе рассчитаны коэффициенты обмена кремнием и минеральным фосфором для поверхностной водной массы (до слоя скачка) в зоне смешения в Двинском и Онежском заливах с учетом потерь на геохимическом барьере река-море. Период условного водообмена составляет для Двинского залива 1,3 года, а для Онежского – 6,5 лет. Обновление запасов кремния происходит в зоне смешения вод Северная Двина - Двинский залив в 6,0 раз быстрее, а в зоне смешения вод Онега - Онежский залив в 1,3 раза быстрее, чем для всего Белого моря. Для минерального фосфора это обновление в зоне смешения двинских и беломорских вод происходит более чем в два раза быстрее, чем для всего Белого моря.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

- Получены статистически обоснованные линейные зависимости между компонентами основного солевого состава в зонах смешения речных и морских вод в Белом море для разных гидрологических периодов. Поведение ионов магния, натрия, калия и сульфатов при смешении речных и беломорских вод во все гидрологические сезоны соответствует консервативному типу. В связи с участием в биохимических процессах, в летне-осенний период поведение гидрокарбонат-ионов и ионов кальция квазиконсервативно.
- Статистический анализ базы данных по пространственной и временной изменчивости солевого состава вод Белого моря показал, что ошибка определения солености по хлорности минимальна для вод с соленостью 10 - 12 ‰ и резко увеличивается с понижением солености.
- В результате экспериментальных исследований и теоретических расчетов определены параметры полинома, связывающего соленость, относительную электропроводимость и температуру в широком диапазоне этих характеристик;
- Биологические процессы играют существенную роль в трансформации потоков кремния и фосфора в зонах смешения речных и морских вод. Удаление растворенного кремния и минерального фосфора в барьерной зоне река-море составляет соответственно 10-15 % и 20-25 % в зависимости от сезона года и

происходит в результате потребления фитопланктонным сообществом и биоседиментации.

- Расчет продукции фитопланктона по убыли биогенных элементов в эвфотическом слое показал, что ее величина от начала вегетации до конца августа составила в зоне смешения вод Северной Двины и Белого моря $4,3 - 6,5 \text{ г С/м}^2$, в зоне смешения вод Онеги и Белого моря $2,3 - 3,6 \text{ г С/м}^2$. В зоне смешения двинских и беломорских вод лимитирующим первичную продукцию компонентом являлся минеральный азот, а в зоне смешения онежских и беломорских вод – кремний.
- Содержание биогенных элементов (кремния и фосфора) в речной воде выше, чем в воде прилегающих к устьям акваторий Белого моря. Геохимический барьер рек-море особенно ярко выражен в Двинском заливе. Коэффициенты обмена кремнием и минеральным фосфором (за счет поступления этих компонентов с речным стоком) в поверхностной водной массе Двинского залива превышают аналогичные показатели для Белого моря в целом более чем в 6 и 2 раза соответственно.

Публикации по теме диссертации:

1. Ефимова Л.Е. Шмидеберг Н.А., Цыцарин А.Г., Овинова Н.А. Химический состав вод устьевой зоны Северной Двины и Двинского залива Белого моря в весенний и осенний периоды 1999 г. // ГОИН. М. 2000. 20 с. Деп. ВИНТИ. № 40-В00, 2000.
2. Ефимова Л.Е., Цыцарин А.Г., Шмидеберг Н.А., Чернова Т.А. Сезонные особенности химического состава вод устьевой области Северной Двины // ГОИН. М. 2001. 17 с. Деп. ВИНТИ. № 39-В01, 2000.
3. Ефимова Л.Е., Лебедев И.М., Цыцарин А.Г., Чернова Т.А. Гранулометрический состав взвесей в зонах смешения Белого, Азовского и Каспийского морей // ГОИН. М. 2001. 17 с. Деп. ВИНТИ. № 39-В01, 2000.
4. Ефимова Л.Е., Русакова К.А., Цыцарин А.Г., Шмидеберг Н.А. О сезонной изменчивости ионного состава вод устья Северной Двины в 2001 г. // ГОИН. М. 2002. 19 с. Деп. ВИНТИ. № 47-В02, 2002.
5. Ефимова Л.Е., Русакова К.А., Цыцарин А.Г., Шмидеберг Н.А. О распределении биогенных элементов и кислорода в устье Северной Двины в 2001 г. // ГОИН. М. 2002. 13 с. Деп. ВИНТИ. № 49-В02, 2002.
6. Ефимова Л.Е., Цыцарин А.Г. Пространственно-временное распределение биогенных элементов в зоне смешения речных и морских вод Двинского залива Белого

моря (на примере устьевой области Северной Двины и верхней части залива) // Труды ГОИН. 2002. Вып. 208. С. 199-216.

7. Савенко А.В., Ефимова Л.Е., Цыцарин А.Г. Поведение стронция, кальция, фтора и бора в устье Северной Двины // Труды ГОИН. 2002. Вып. 208. С. 217-225

8 Ефимова Л.Е., Русакова К.А., Цыцарин А.Г. Распределение биогенных элементов в устьевой области Северной Двины // Материалы международной конференции «Экология Северных территорий России. Проблемы. Прогноз. Пути развития. Решения» Архангельск. 2002. С. 128-133.

9. Efimova L.E., Rusakova K.A. Peculiarities of distribution of hydrochemical characteristics at the Mouth of Northern Dvina river // Материалы международного совещания «Взаимодействие суша-океан в Российской Арктике». М. ИО РАН. 2002. С. 518-520.

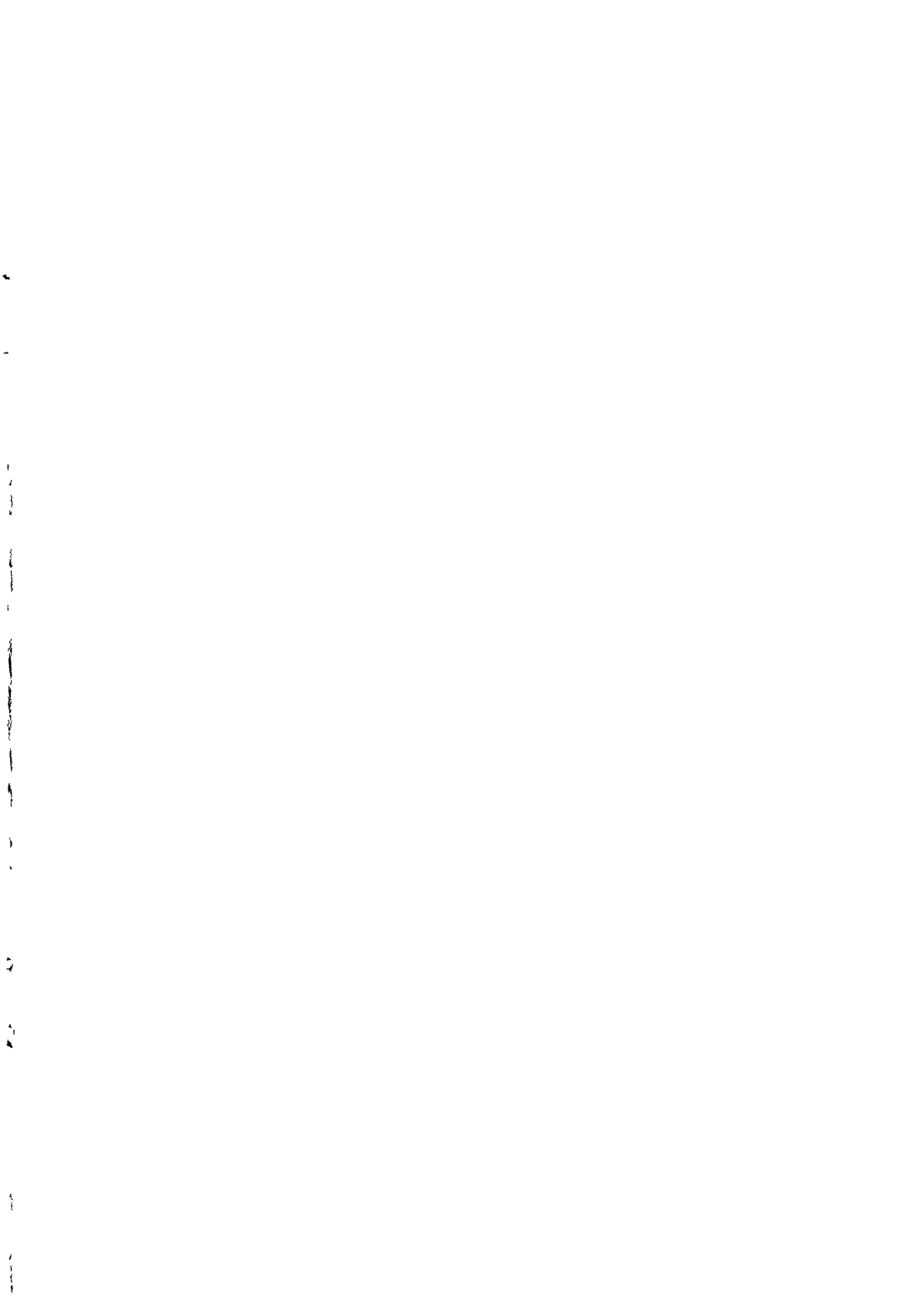
10. Savenko A.V., Chevchenko V.P., Novigatskii A.N. and Efimova L.E. Effect of Seasonal Variability in the Riverine Runoff on the Distribution of Dissolved Forms of Strontium, Calcium, Fluorine, and Boron in the Mouths of the Severnaya Dvina and Onega Rivers // Marine Chemistry. 2003. V.43. Suppl. 1. P. 99-107.

11 Ефимова Л.Е. Сезонная динамика растворенных фосфатов и кремния в устьевых областях рек Северная Двина и Онега // Материалы международной конференции «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения». Апатиты. 2004. С. 51-52.

12. Efimova L.E. On the seasonal dynamic of dissolved silica and inorganic phosphorus in river estuaries of the White Sea // Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA project. Moscow. 2004. P. 27-28.

13. Gogina M.A., Efimova L.E., Zaslavskaja M.B. Solute flow from the European part of Russia into Arctic Seas // Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA project. Moscow. 2004. P. 31-32.

Отпечатано в копицентре «СТ ПРИНТ»
Москва, Ленинские горы, МГУ, 1 Гуманитарный корпус.
www.stprint.ru e-mail: zakaz@stprint.ru тел.: 939-33-38
Тираж 100 экз. Подписано в печать 21.11.2005 г.



№ 22928

РНБ Русский фонд

2006-4

26979