

МУРМАНСКИЙ МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН

На правах рукописи

Р.З.А.

Здоровеннов Роман Эдуардович

**ПРИЛИВНОЙ ПЕРЕНОС ПРИМЕСИ
В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ БЕЛОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 - ОКЕАНОЛОГИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

**Мурманск
2004**

Работа выполнена в Институте Водных проблем Севера Карельского
Научного Центра РАН

Научные руководители:

доктор географических наук,
профессор

Фукс Виктор Робертович

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических
наук,

Зув Алексей Николаевич

доктор географических наук,
профессор

Некрасов Алексей Всеволодович

Ведущая организация: Санкт-Петербургское отделение государственного океанографического Института

Защита состоится 23 декабря 2004 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 002.140.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата географических наук Мурманского морского биологического института КНЦ РАН по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского морского биологического института КНЦ РАН по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17.

Автореферат разослан «22» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат географических наук



Е.Э. Кириллова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В связи с возрастающим антропогенным воздействием на экосистемы прибрежных акваторий Белого моря актуальной задачей научных исследований является разработка и усовершенствование методов оценки состояния, управления, охраны и рационального использования их ресурсов. Наряду с натурными исследованиями акваторий, перспективным путем решения широкого круга задач, в том числе и проблемы изучения закономерностей распространения и трансформации примеси в прибрежных районах, является математическое моделирование. Проведены многочисленные исследования, посвященные моделированию приливного переноса и диффузии примеси в прибрежной морской зоне и приливных эстуариях (Альхименко и др., 1996; Дмитриев, 1995; Моделирование..., 1979; Проблемы..., 1986; Руховец, 1982; Aldridge, 1997; Bai, Wang, Shen, 2003; Xing, Davies, 2003; и др.). Для акваторий северных морей нашей страны можно привести примеры моделирования переноса и трансформации радионуклидов по акваториям Баренцева и Карского морей (Kulakov et al., 1995), распространение загрязняющих веществ в эстуарии р. Сев. Двины Белого моря (Бреховских и др., 1997; Бреховских, Перекальский, 2002). Подобные работы по другим акваториям Белого моря до сих пор, насколько нам известно, не проводились.

Приливные процессы в существенной степени определяют динамику вод, распространение вещества, функционирование экосистемы Белого моря. В связи с этим изучение влияния приливной динамики на перенос и диффузию примеси в прибрежной зоне Белого моря является важной задачей научных исследований. Поскольку Онежский и Кандалакшский заливы, выбранные нами в качестве объектов исследования, являются по данным В.В. Сапожникова и С.А. Соколовой (1994) подверженными значительному антропогенному воздействию, загрязненными районами Белого моря актуальность моделирования переноса примеси в этих заливах очевидна для решения многих задач.

Берега Онежского и Кандалакшского заливов отличаются значительной изрезанностью, наличием большого количества островов. Поэтому на приливной перенос примеси в прибрежной зоне заливов существенное влияние оказывают мелководье и очертания береговой линии. Особую сложность представляет изучение приливного переноса примеси в эстуариях, в которых происходит взаимодействие приливных течений и речных потоков. Математическое моделирование в сочетании с анализом данных натурных измерений позволяет выявить и картировать особенности распространения и трансформации примесей при разнообразном комплексе внешних условий.

Такой подход позволяет повысить эффективность мероприятий по улучшению качества водной среды, а также по снижению риска от чрезвычайных антропогенных экологических ситуаций (поступление нефтепродуктов при авариях судов, аварийные сбросы сточных вод в прибрежной зоне, добыча полезных ископаемых).

Цель работы – исследование особенностей приливного переноса примеси в прибрежных районах Белого моря, подверженных значительному антропогенному воздействию. В связи с этим были поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучение особенностей приливных явлений мелководных прибрежных акваторий Белого моря по данным многолетних экспедиционных исследований.
2. Моделирование приливной динамики исследуемых акваторий и оценка возникающей в них остаточной приливной циркуляции.
3. Оценка адекватности результатов моделирования приливной динамики исследуемых акваторий путем сравнения с данными натурных измерений.
4. Моделирование приливного переноса примеси в мелководной прибрежной зоне при изменяющемся комплексе внешних условий, определяемых как антропогенными факторами, так и природными условиями (высота прилива, сток рек, объемы сточных вод).
5. Изучение особенностей распространения примеси в мелководных акваториях при действии локального источника, имитирующего в бухте Никольской и устье р. Кереть мидиевые плантации, в устьях рек Онеги, Кеми и Выга сбросы неочищенных сточных вод и аварийные экологические ситуации.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- результаты анализа данных натурных наблюдений процессов приливного перемешивания вод в прибрежных районах Онежского и Кандалакшского заливов Белого моря;
- результаты численного моделирования приливной динамики изучаемых акваторий, оценка возникающей в них остаточной приливной циркуляции;
- оценка вклада различных членов уравнений движения в особенности приливной динамики исследуемых акваторий;
- выявленные закономерности распространения примеси в мелководных бухтах, эстуариях и Онежском заливе Белого моря при изменяющихся внешних факторах, таких как условия сизигийного и квадратурного прилива, весеннего паводка, а также при варьировании

коэффициентами неконсервативности примеси и горизонтального турбулентного обмена.

Объектами исследования настоящей диссертационной работы являются подверженные значительному антропогенному воздействию Онежский залив Белого моря, мелководные эстуарии рек Онега, Кемь и Выг Онежского залива, а также эстуарий р. Кереть и бухта Никольская, расположенные в Кандалакшском заливе.

Материалы и методы исследований. В работе использовались натурные данные, полученные в ходе следующих экспедиций:

- 1982-83 гг. – устье р. Онеги (ИВПС КарНЦ РАН);
- 1982-83 гг. – Соловецкие Салмы Онежского залива (ИВПС КарНЦ РАН);
- 1994, 1995, 1998 и 2000 гг. – устье р. Кереть и бухта Никольская Кандалакшского залива (кафедра океанологии СПбГУ);
- 2000-01 г. – губа Чупа Кандалакшского залива, Онежский залив и эстуарий р. Кемь (ИВПС КарНЦ РАН);

Автор принимал непосредственное участие в экспедициях кафедры океанологии в губе Чупа Кандалакшского залива и в экспедиции ИВПС КарНЦ РАН в Онежском заливе в 2001 г., а также в обработке и анализе полученных данных.

Для модельных расчетов приливной динамики и переноса примеси в прибрежных мелководных районах Белого моря использовалась программа CARDINAL (Вольцингер и др., 1989; Клеванный, 1999; Klevanny, Matveyev, 1993), реализующая систему уравнений мелкой воды и уравнение горизонтального переноса и турбулентной диффузии примеси в криволинейных координатах и предназначенная для исследования динамики прибрежных вод. Для задания начальных условий при моделировании использовались гидрологические ежегодники, другие опубликованные материалы, а также данные экспедиционных наблюдений в заливах и бухтах Белого моря. Достоверность полученных результатов расчетов была подтверждена имеющимися натурными измерениями. При построении расчетных сеток использовались навигационные карты. В работе применялись стандартные методы статистической обработки.

Научная новизна полученных результатов:

- Исследованы особенности приливных явлений и связанных с ними процессов переноса примеси в слабо изученных мелководных прибрежных районах Белого моря.
- Впервые для Онежского залива и мелководных прибрежных районов устьев рек Онега, Кемь, Выг, Кереть и бухты Никольской было

проведено моделирование приливных явлений и переноса примеси с использованием подробных криволинейных координатных сеток, позволивших с высокой степенью точности воспроизвести особенности морфометрии мелководных прибрежных акваторий.

- Выявлена важная роль нелинейных эффектов в динамике приливов в мелководной прибрежной зоне.
- Показано, что сезонные условия (весенний паводок) оказывают существенное влияние на характер переноса примеси в мелководных прибрежных районах и эстуариях.
- Впервые оценены особенности распространения примеси в мелководных акваториях при действии локального источника, имитирующего в бухте Никольской и устье р. Кереть мидиевые плантации, в устьях рек Онеги, Кеми и Выга сбросы неочищенных сточных вод и аварийные экологические ситуации.

Практическая значимость работы. Впервые так комплексно и подробно изучена динамика вод, приливной перенос в ряде малоисследованных районов Белого моря. Полученные в работе результаты могут быть использованы при решении задач охраны окружающей среды, в частности, при изучении приливного переноса примеси в прибрежной зоне, при разработке рекомендаций по оптимизации управления природными ресурсами в устьевых областях рек бассейна Белого моря. Полученные результаты позволят повысить эффективность мероприятий по улучшению качества водной среды, а также снизить риск от последствий чрезвычайных антропогенных экологических ситуаций. Выявленные закономерности распространения примеси могут быть использованы при ликвидации чрезвычайных ситуаций, для принятия мер по оптимизации сбросов сточных вод в исследуемые акватории. Результаты работы могут служить основой при планировании натурных экспериментов и при анализе различных экологических процессов, например, при обосновании выбора зон, наиболее благоприятных для разведения марикультуры.

Апробация работы. Результаты работы были использованы при выполнении фундаментальных исследований по программам ООФАГ и ОНЗ РАН, тем РФФИ и международных проектов. В частности:

- тема РФФИ № 03-05-64079а «Комплексный мониторинг динамики вод, наносов и рельефа, антропогенного загрязнения и условий существования биоты эстуариев Белого моря» (2001-2002 гг.);
- тема РФФИ № 03-05-79028 «Организация и проведение экспедиции на Белом море по изучению динамики вод, наносов и

рельефа, антропогенного загрязнения и условий существования биоты эстуариев» (2001-2002 гг.);

- тема ИВПС Карельского НЦ РАН № 55 «Исследования основных элементов экосистемы Белого моря и роли абиотических факторов в ее развитии» (2002-2005 гг.);
- международный проект ИНКО-Коперникус № ICA2-1999-10167 «Устойчивое управление морской экосистемой и природными ресурсами Белого моря – WHITESEA» (2001-2002 гг.).

Основные результаты диссертации докладывались и были представлены на VII Молодежной научной конференции Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, 2000), на Международной конференции «Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура» (Архангельск, 2000), на Международной конференции «Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность» (Мурманск, 2000), на Международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения» (Архангельск, 2002), на Международной конференции «Моделирование живых ресурсов Белого моря» (Хельсинки, 2002), в отчетах кафедры океанологии СПбГУ по проекту «Белое море», на семинарах лабораторий географии и гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ, из них две статьи – в рецензируемых журналах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии, включающей 224 наименование, из них 97 на иностранных языках и 2 приложений. Общий объем работы – 157 машинописных страниц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю глубокую благодарность научному руководителю д.г.н. проф. В.Р. Фуксу за постановку задачи, всестороннюю помощь, ценные советы и рекомендации. За помощь в проведении исследований, обсуждении и анализе их результатов и ценные советы автор глубоко признателен научным консультантам д.г.н. проф. Н.Н. Филатову, к.т.н. А.Ю. Тержевику, а также сотрудникам лабораторий гидрофизики и географии ИВПС КарНЦ РАН: к.г.н. П.М. Бояринову, А.А. Колодочке, М.П. Петрову, к.г.н. Н.И. Пальшину, А.В. Митрохову, сотруднику лаборатории региональной океанологии Института географии СПбГУ А.Н. Мичурину, д.ф.-м.н. К.А. Клеванному за ценные консультации по работе с моделирующей системой CARDINAL, чл.-корр. РАН Ю.С. Долотову, руководителю тем РФФИ, участие в которых позволило соискателю получить новые экспедиционные данные.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, дана оценка новизны и практической значимости полученных результатов, приведена краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе выполнен анализ отечественной и зарубежной литературы по математическому моделированию приливной циркуляции и переноса вещества в мелководных прибрежных районах морей и эстуариях. Исследование приливов в таких районах осложняется значительной возрастающей ролью придонного трения, отражением приливной волны от берегов, трением о ледяной покров в зимний период, взаимодействием речного потока и морских вод. При моделировании приливо-отливных течений применяются уравнения гидродинамики, упрощенные в зависимости от задачи и объекта исследования.

В работах многих исследователей (Дебольский и др., 1984; Некрасов, 1975; LeBlond, 1978; Lee et. al., 2001) показано, что в уравнениях сохранения импульса баланс осуществляется между силой, обусловленной горизонтальным градиентом давления, и силой трения. Такой режим распространения приливной волны называют градиентно-вязким (Зырянов, Лейбо, 1985; Музылев и др., 1985). Его использование для изучения распространения длинной гравитационной волны на мелководье возможно при условии, что глубина исследуемого водоема меньше некоторого критического значения (10-20 м). На мелководье происходит выход нижнего пограничного слоя в приповерхностную область и смыкание его с верхним пограничным слоем. Турбулентное перемешивание охватывает всю толщу вод, а зона смыкания двух пограничных слоев представляет собой фронтальную зону, отделяющую стратифицированные воды глубоководной части моря от однородных вод мелководья (Лапина, 2001).

Трансформация приливной волны на мелководье может приводить к повышению уровня воды в направлении вершины залива (Лапина, 2001; Лупачев, 1989; Зырянов, Музылев, 1988). Это явление получило название приливной накачки уровня. Она приводит к генерации остаточных вдольбереговых перемещений водных масс и взвеси. Постоянно действующие остаточные приливные течения в значительной мере определяют перенос вещества в мелководной прибрежной зоне морей, мелководных заливах и эстуариях (Carbajal, Bachaus, 1998, Jakobsen et. al., 2003, McLaughlin et al., 2003, Williams et. al., 2000).

Далее приводится обзор существующих моделей приливов для всего Белого моря и различных его районов (Вольцингер, Пясковский, 1977;

Лупачев, 1974; Сеземан, 1978; Кравец, 1981; Сгибнева, 1982; Цвезинский, 1989, 1995; Дианов и др., 1990; Матрюков, Веренчиков, 1997). Рассмотрены основные особенности колебаний уровня Белого моря, приливных явлений моря в целом и его заливов, изложенные в монографиях (Инжебейкин, 2003) и "Гидрометеорология ...", вып. 1 (1991). Рассмотрена модель распространения загрязняющих веществ в устье Северной Двины (Бреховских и др., 1997, Бреховских, Перекальский, 2002).

В данной работе для моделирования процессов переноса примеси в мелководных прибрежных акваториях Белого моря была использована гидродинамическая моделирующая система CARDINAL (Вольцингер и др., 1989, Клеванный, 1999, Klevanny, Matveyev, 1993). Эта модель реализует систему уравнений мелкой воды, уравнение горизонтального переноса и турбулентной диффузии примеси и предназначена для исследования динамики прибрежных вод. Программа использует криволинейную систему координат, что особенно удобно при аппроксимации расчетной области в прибрежной зоне.

Во второй главе приводится физико-географическое описание Белого моря, рассмотрены основные особенности его приливо-отливных явлений. В Белом море преобладают приливные волны полусуточного периода: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 . Из-за морфометрических особенностей, сложного очертания береговой линии моря эти волны нелинейно искажаются, взаимодействуют друг с другом, создавая дополнительные мелководные гармоники M_4 , MS_4 (1/4-суточные волны), M_6 (1/6-суточная волна). Основными суточными приливными волнами в Белом море являются волны K_1 и O_1 . Высота прилива в Белом море значительно меняется от района к району. В Мезенском заливе наблюдается наибольшая величина прилива (5-7 м). В Горле величина прилива уменьшается до двух-четырех м, в Бассейне наблюдаются наименьшие высоты прилива (около одного метра). А в Онежском и Кандалакшском заливах приливные колебания уровня вновь возрастают (1.5-2 м). Максимальные приливные течения отмечаются в Воронке, Горле и Мезенском заливе (более $200 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$), а также в Соловецких Салмах Онежского залива (более $150 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$). В Бассейне, Кандалакшском и Двинском заливах скорости приливных течений невелики и составляют $10-40 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ (Гидрометеорология..., 1991).

Далее дано описание объектов исследования, а также экспериментов, проведенных в ходе экспедиционных исследований кафедры океанологии СПбГУ и Института водных проблем Севера КарНЦ РАН в Онежском и Кандалакшском заливах Белого моря. Приведено описание основных характеристик используемых приборов с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности и разрешающей способности.

Анализ натуральных данных показал, что в Онежском и Кандалакшском заливах Белого моря происходит интенсивное приливное перемешивание вод в мелководной прибрежной зоне, где в летний период наблюдается неоднородное распределение температуры и солености по глубине, связанное в первую очередь с прогревом верхнего слоя. На небольших глубинах (до 10-15 м) водная толща по глубине стратифицирована слабо. Хорошо выраженная стратификация наблюдается лишь в районах с глубинами более 15 м. Установлено, что речные воды и взвесь поступают в верхний слой и при небольших глубинах в фазу прилива перемешиваются по всему водному столбу, а в более глубоких районах перемешивание происходит только в верхнем слое. В районах с глубинами более 15 м в нижнем слое располагаются холодные морские воды с повышенными значениями солености. В устьях рек наблюдается солевой клин, который деформируется и разрушается в процессе эволюции приливного фронта. Уже в начале сентября в исследованных районах заливов отмечается практически полная однородность температуры и солености по глубине.

В Онежском и Кандалакшском заливах доминирует полусуточная волна M_2 . На входе в Онежский залив приливные течения имеют реверсивный характер. Минимальные амплитуды колебаний уровня отмечаются на открытых акваториях, максимальные – в районах устьев рек и на мелководьях. Практически везде наблюдается неравенство приливных и отливных фаз. В устьях рек отмечено уменьшение скоростей приливных течений, что можно объяснить трансформацией приливной волны на мелководье и ее взаимодействием с речным потоком. Этим же можно объяснить наблюдавшиеся в зимний период вертикальные градиенты скорости и наличие разнонаправленных потоков в устье р. Онеги (Лифшиц, Бояринов, 1984, Лифшиц, Титов, 1985).

В третьей главе приводятся результаты моделирования приливной динамики исследуемых акваторий. С помощью моделирующей системы CARDINAL были проведены численные эксперименты по расчету хода уровня и приливных течений для акваторий Онежского залива, бухты Никольской, устьев рек Онеги, Кеми, Керети при изменяющемся комплексе внешних условий (высота прилива, сток рек).

Средненные по глубине уравнения мелкой воды и уравнение распространения примеси в данной модели приняты в виде (Клеванный, 1999):

$$\begin{aligned}
 U_t + \left(\frac{U^2}{H}\right)_x + \left(\frac{UV}{H}\right)_y &= -gH\zeta_x + fV + K\Delta U - f_b \frac{U|\bar{V}|}{H^2} \\
 V_t + \left(\frac{UV}{H}\right)_x + \left(\frac{V^2}{H}\right)_y &= -gH\zeta_y - fU + K\Delta V - f_b \frac{V|\bar{V}|}{H^2}, \quad (1) \\
 \zeta_t + U_x + V_y &= 0 \\
 (\bar{c}H)_t + (U\bar{c})_x + (V\bar{c})_y &= AH\Delta\bar{c} - \lambda\bar{c}H
 \end{aligned}$$

где U и V – полные потоки, H – полная глубина потока, g – ускорение силы тяжести, ζ – уровень свободной поверхности, f – параметр Кориолиса, K – коэффициент горизонтального турбулентного обмена, f_b – коэффициент придонного трения, \bar{c} – осредненная по глубине концентрация, A – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии примеси, λ – коэффициент неконсервативности примеси.

Коэффициенты, входящие в систему уравнений (1), в пакете CARDINAL заданы следующим образом. Параметр Кориолиса рассчитывается по формуле:

$$f = 2\omega \sin \varphi, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта места.

Значение коэффициента горизонтального турбулентного обмена K определяется выражением:

$$K = 0.15 L^2 \mathbf{Grad} V, \quad (3)$$

где L – шаг сетки, $\mathbf{Grad} V$ – сумма градиентов составляющих скорости.

Для коэффициента придонного трения f_b установлена безразмерная величина 0.014. Его величина считается постоянной по всей расчетной области.

Для определения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии примеси A используется эмпирическая формула, связывающая этот коэффициент с масштабом процесса L (Okubo, 1962):

$$A = 10^{-6} e^{(1.15 \ln(100L))} \quad (4)$$

Под масштабом процесса понимается локальный шаг сетки.

Коэффициент неконсервативности λ используется для учета степени химической, биологической или радиоактивной неконсервативности исследуемого вещества.

Система уравнений (1) решается при следующих граничных условиях. На твердых границах расчетной области принимается условие непротекания. На открытых границах задаются колебания уровня свободной поверхности и расходы рек в виде временного хода, аналитического выражения или постоянного значения. Концентрации примеси задаются по всей акватории в виде начального поля концентраций или в виде точечных источников.

Для учета сложного очертания береговой линии исследуемых акваторий, расположенных в них островов и особенностей рельефа дна были построены криволинейные координатные сетки с пространственным шагом около 2-3 км для Онежского залива и десятки-сотни метров для бухты Никольской и устьев рек. Для всех акваторий были рассчитаны ежечасные поля скоростей приливных течений на два приливных цикла и положений уровня на 10 приливных циклов. Был проведен спектральный анализ рассчитанных приливных колебаний уровня. Выявлены следующие особенности пространственно-временной структуры приливных движений и хода уровня в исследуемых акваториях.

На большей части акватории **Онежского залива** приливные течения имеют реверсивный характер, при этом они ориентированы вдоль продольной оси залива. Максимальные скорости приливных течений отмечаются в проливах в районе Соловецких островов и Кондострова и достигают значений $150 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. В вершине и на выходе из залива скорости приливных течений изменяются в течение приливного цикла в пределах $10\text{-}100 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, в средней части залива – в пределах $40\text{-}80 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. В вершине залива приливная волна близка к стоячей, в средней части залива она имеет прогрессивно-стоячий, на выходе из залива – прогрессивный характер. По мере продвижения к вершине залива амплитуда приливного уровня увеличивается. В мелководных районах отмечается нелинейность хода уровня – неравенства времени роста и падения уровня, полных и малых вод. Также отмечаются неравенства в скоростях приливных течений.

Спектральный анализ рядов хода уровня за 10 приливных циклов показал наличие $1/4$ - и $1/6$ -суточных волн в вершине залива и в мелководных прибрежных районах (рис. 1). Проведенные эксперименты по выяснению вклада различных членов уравнений движения в деформацию приливной волны позволили сделать вывод о том, что нелинейное искажение приливной волны в значительной мере

обусловлено мелководностью Онежского залива. Шести- и четырехчасовые волны появляются в вершине залива и в мелководных прибрежных районах, когда приливное возвышение уровня становится сравнимым с глубиной. При этом нелинейность конвективных ускорений и донного трения играют второстепенную роль. Рассчитанные для акватории Онежского залива с помощью моделирующей системы CARDINAL приливные течения и ход уровня неплохо согласуются с натурными данными и результатами моделирования, полученными другими исследователями (Лифшиц, Бояринов, 1984, Лифшиц, Титов, 1985, Цвезинский, 1989, Дианов и др., 1990).

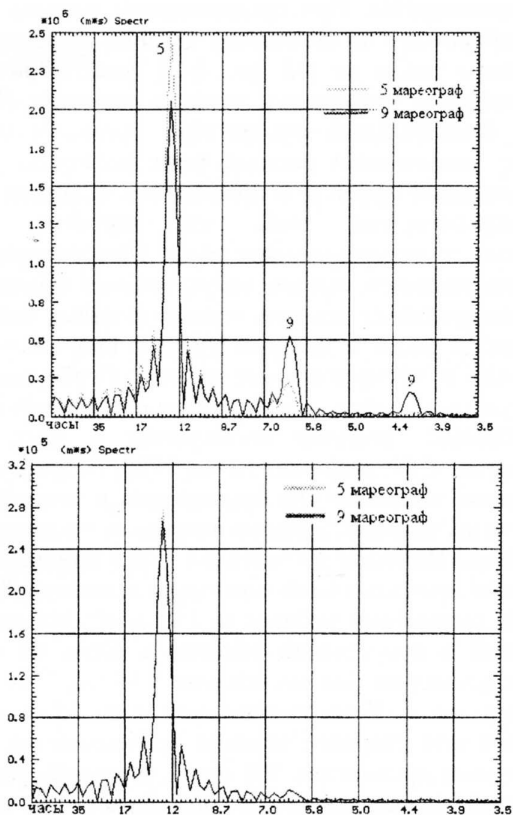


Рис. 1. Спектры уровня моря в пунктах, расположенных в мелководных прибрежных районах: слева – реальные глубины, справа – приглубый берег.

Расчет особенностей приливной динамики в устье р. Онеги показал, что приливные течения в этой акватории имеют реверсивный характер, приливная волна относится к стоячему типу. Доминирующей в приливных колебаниях уровня является волна M_2 , а также ее обертоны – волны M_4 и M_6 . Ход уровня в приустьевой области имеет нелинейный характер: время роста уровня составляет 3 ч 55 мин, время падения – 8 ч 30 мин. Высота прилива составляет 0.9-1.0 м; высота отлива – 0.1 м при максимальном расходе реки, 0.5 м – при среднегодовом и 0.6 м – при минимальном расходе. Таким образом, при увеличении расхода реки величина прилива остается практически неизменной, а величина отлива существенно уменьшается. При среднегодовом расходе реки скорость суммарного (приливного и стокового) течения изменяется в течение приливо-отливного цикла от 1-2 до 50-55 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. При максимальном расходе реки скорость суммарного течения достигает 100-105 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ в конце отлива. Спектральный анализ хода уровня в устье р. Онеги показал, что с увеличением расхода реки несколько увеличиваются остаточные приливные эффекты и практически остаются без изменений основные энергонесущие пики на частотах полусуточных, четвертьсуточных и четырехчасовых волн. При подавлении эффектов мелководья увеличивается высота полусуточного прилива, становятся незначительными разности величин полных и малых вод, сравнивается продолжительность роста и падения уровня, пропадают мелководные четвертьсуточные и четырехчасовые волны. Особенности приливной циркуляции в устье р. Онеги, рассчитанные с помощью моделирующей системы CARDINAL неплохо согласуются с данными натурных измерений (Руднев, 1984, Лифшиц, Титов, 1985, Петров, 1985), несмотря на то, что полевые эксперименты проводились в зимний период, а при модельных расчетах влияние ледяного покрова не учитывалось.

Устье р. Кемь. На входе в Онежский залив приливная волна имеет преимущественно прогрессивный характер с амплитудой около 0.6 м и максимальными скоростями течений до 150 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. На приливе и отливе скорости течений в приустьевой области р. Кемь незначительны, на большей части акватории они составляют 5-15 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$, в узостях между островами и в устье р. Кемь увеличиваются до 35 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. В моменты полных и малых вод скорости течений возрастают до 50-75 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$, в узостях их значения превышают 100 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. В пункте, расположенном в устье р. Кемь, наблюдается незначительное неравенство времени роста и падения уровня: время роста на 5-10 минут меньше времени падения. Неравенство полных и малых вод проявляется слабо. Остаточная приливная циркуляция в акватории мала. Результаты моделирования

приливных явлений в устье р. Кемь достаточно адекватно описывают особенности приливной динамики акватории (Dolotov et. al., 2002).

Устье р. Кереть. Приливные колебания уровня синхронны по всей акватории Керетского рейда, мало изменяются по высоте. Наблюдается незначительное неравенство полных и малых вод: отклонение уровня от равновесного положения несколько больше на полной воде. Скорости приливных течений в зависимости от морфометрических особенностей, расхода р. Кереть и варианта сизигийного или квадратурного прилива существенно изменяются по акватории Керетского рейда. В квадратуру скорости суммарного (стокового и приливного) течения в двух пунктах акватории (расположенных в устье р. Кереть и на расстоянии 1.6 км мористее) меняются от 10 (пункт 1) и 3 (пункт 2) при максимальном до 2 см·с⁻¹ (в обоих пунктах) при минимальном расходе реки. При тех же расходах реки в сизигию скорости меняются от 12 (пункт 1) и 4 (пункт 2) до 2-3 см·с⁻¹ (в обоих пунктах) соответственно. В сизигию скорости приливного течения оказываются больше скоростей стокового, и между ними происходит нелинейное взаимодействие, приводящее к существенным фазовым сдвигам и обертонам, особенно заметным на приливе в паводок. В сизигию при максимальном расходе р. Кереть на полной воде скорости течений незначительны, на большей части акватории не превышают 5-7 см·с⁻¹, скорость стокового течения составляет 10-15 см·с⁻¹. В фазу отлива скорости течений составляют 5-10, в узостях возрастают до 15-20 см·с⁻¹. На малой воде скорости течений минимальны, составляют 1-3 см·с⁻¹, стоковое течение максимально развито – его скорости достигают значений 25 см·с⁻¹. В фазу прилива в результате взаимодействия стокового и приливного течений в приустьевой области наблюдается сложная переходная система течений, возникают круговороты, скорости течений незначительны, не более 1-2 см·с⁻¹. В проливах скорости приливных течений достигают 10 см·с⁻¹, скорость стокового течения составляет 20 см·с⁻¹. Остаточная приливная циркуляция на акватории бухты незначительна. Результаты моделирования особенностей приливных явлений в устье р. Кереть хорошо согласуются с данными натуральных измерений (Отчеты по х/д темам 1993-1994 гг., архив каф. океанологии СПбГУ; Долотов и др., 2001а; Долотов и др., 2002а; Dolotov et. al., 2002).

Приливные колебания в бухте **Никольской** формируются полусуточной стоячей волной – фазы уровня и течений сдвинуты на три часа. Прилив в бухте несколько искажается из-за мелководья – время падения уровня больше времени роста на один час. Амплитуда колебаний уровня практически не меняется на акватории бухты, увеличение амплитуды в вершине бухты не

превышает 0.01 м. На приливе и отливе скорости течений по всей акватории бухты максимальны, их значения изменяются в пределах 10-20 см·с⁻¹, на полной и малой воде наблюдается сложная система течений со скоростями, не превышающими 5-7 см·с⁻¹. Остаточная приливная циркуляция на акватории бухты незначительна. Результаты моделирования приливных явлений в бухте Никольской неплохо согласуются с данными экспедиционных исследований (Дианов и др., 1990; Мичурин и др., 1997).

Сравнение данных экспедиционных исследований приливов с результатами гидродинамического моделирования показало, что модель CARDINAL адекватно воспроизводит приливную динамику исследуемых акваторий.

В четвертой главе дана характеристика экологического состояния Белого моря. Показано, что основными источниками антропогенного загрязнения Белого моря являются лесоперерабатывающая, горнодобывающая и нефтяная промышленность, причем значительная часть загрязняющих веществ поступает с речным стоком. Сточные воды предприятий лесной и целлюлозно-бумажной промышленности вносят в море лингосульфаты, фенолы, метиловый спирт. Предприятия горнодобывающей промышленности являются источником поступления в море тяжелых металлов, таких как никель, хром, медь, цинк, свинец, ртуть и других; от предприятий нефтяной промышленности поступают непредельные углеводороды, нафтеновые кислоты, полихлорбифенилы, сера, свинец и другие загрязнители (Наумов, Федяков, 1993). За год с речным стоком в Белое море выносится около 2900 т нефтепродуктов, 754 т детергентов, 10 т фенолов, 0.137 т хлорорганических пестицидов (Белое море. Биологические..., 1995).

Далее в четвертой главе приведены основные результаты расчетов приливного переноса примеси в исследуемых акваториях. Под примесью в модели понимается некая субстанция, консервативная или неконсервативная, с размерностью «условная единица на единицу объема».

В устье р. Онеги при постоянно действующем источнике примеси, имитирующем поступление сточных вод, характер распространения примеси существенно определяется величиной расхода реки. При **среднегодовом** расходе реки за первые сутки происходит перенос примеси на 10-12 км от устья (рис. 2, слева). В течение первых пяти суток передний фронт примеси удаляется от устья со скоростью около одного км в сутки. В дальнейшем распространение переднего фронта примеси приостанавливается, происходит накопление примеси в непосредственной близости от источника (устья реки), причем по обе стороны от устья формируются области с повышенной концентрацией примеси. Вдоль берега формируется полоса примеси шириной около 15 км с постепенно возрастающими концентрациями.

При **максимальном** расходе реки за первые сутки примесь распространяется на 16-18 км от устья (рис. 2, справа). В дальнейшем на некотором расстоянии от источника формируется вытянутое по нормали к берегу пятно с повышенными концентрациями примеси. Передний фронт этого пятна в течение первых пяти суток действия источника примеси удаляется от него со скоростью около трех км в сутки. В следующие двое-трое суток скорость распространения переднего фронта пятна примеси снижается до одного км в сутки. Расчет распространения примеси на период более 10 суток показал, что пятно примеси продолжает распространяться по акватории залива со скоростью около одного км в сутки, при этом концентрация примеси внутри пятна растет. Однако расчет распространения примеси при задании максимально возможного расхода на длительный период нецелесообразен, так как период паводка на реке имеет ограниченную длительность.

При **кратковременном** действии источника примеси (в течение одних суток), имитирующем аварийное поступление примеси, и **среднегодовом** расходе реки, в течение пяти суток вся примесь переносится на расстояние около восьми км от источника. При этом происходит формирование пятен с повышенной концентрацией примеси по обе стороны от источника.

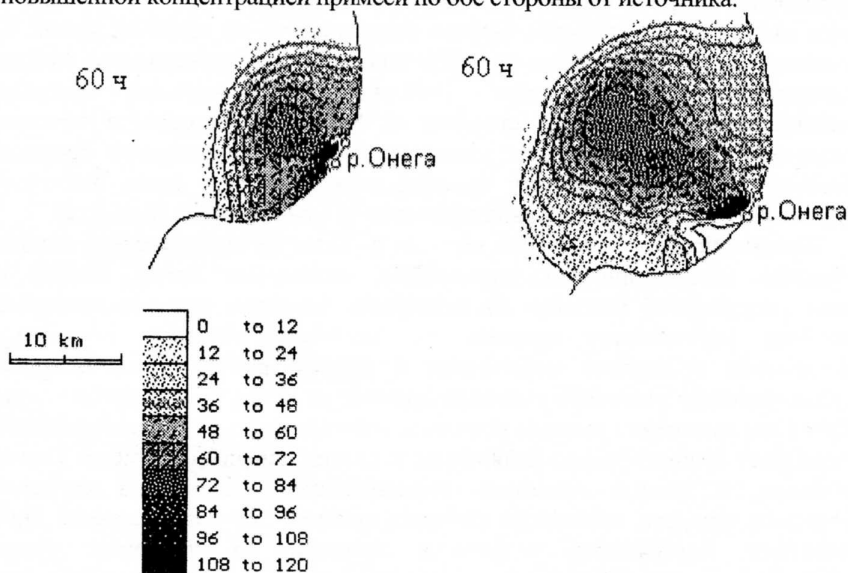


Рис. 2. Распространение примеси в устье р. Онеги при среднегодовом (слева) и максимальном (справа) расходе реки за 60 ч счета.

Эксперименты по оценке вклада коэффициента неконсервативности в пространственно-временную изменчивость поля концентраций общего фосфора при его кратковременном поступлении в вершине Онежского залива (в течение суток) показали, что разница в концентрациях с учетом коэффициента неконсервативности и без достигает 30 и 50% к концу вторых и третьих суток соответственно. При расчетах на меньшие промежутки времени учет коэффициента неконсервативности не дает существенных отличий в концентрациях общего фосфора.

В устьевой области **р. Кемь** перенос примеси имеет следующие особенности. В момент равновесного положения уровня на приливе пятно примеси вытянуто вдоль материкового берега в виде узкой полосы (рис. 3, а). Концентрация примеси максимальна в средней части этой полосы на расстоянии до двух км от источника.

Затем картина существенно меняется. В конце прилива пятно примеси начинает смещаться вправо от устья реки. В момент полной воды основной поток примеси направлен ниже о. Якостров. При этом максимальные концентрации примеси наблюдаются вдоль материкового берега. В момент равновесного положения уровня на отливе вся примесь переносится вправо и вниз от устья р. Кемь (рис. 3, б). В следующие 3 часа отлива поток примеси быстро возвращается на прежнее место. К моменту малой воды пятно примеси заполняет все пространство между материком и о. Якостров. Небольшие концентрации примеси наблюдаются с мористой стороны о. Якостров, которые в течение следующих двух часов счета уносятся отливным течением за пределы сеточной области. К началу прилива пятно примеси вновь вытянуто вдоль материкового берега акватории в виде узкой полосы (рис. 3, в).

Таким образом, в устьевой области р. Кемь на определенной стадии прилива пятно примеси оказывается вытянутым вдоль берега в непосредственной близости от источника. Сильные приливо-отливные течения перемещают примесь по акватории, однако, поскольку остаточная приливная циркуляция в данном районе незначительна, существенного итогового удаления примеси от источника не происходит. При этом изменение расхода реки от минимального до максимального не оказывает существенного влияния на характер переноса примеси. Таким образом, в данной акватории определяющее влияние на характер переноса примеси оказывают сильные приливо-отливные течения. При действии постоянного источника примеси со временем будет происходить ее накопление в мелководной прибрежной зоне, что представляет опасность для донных сообществ акватории.

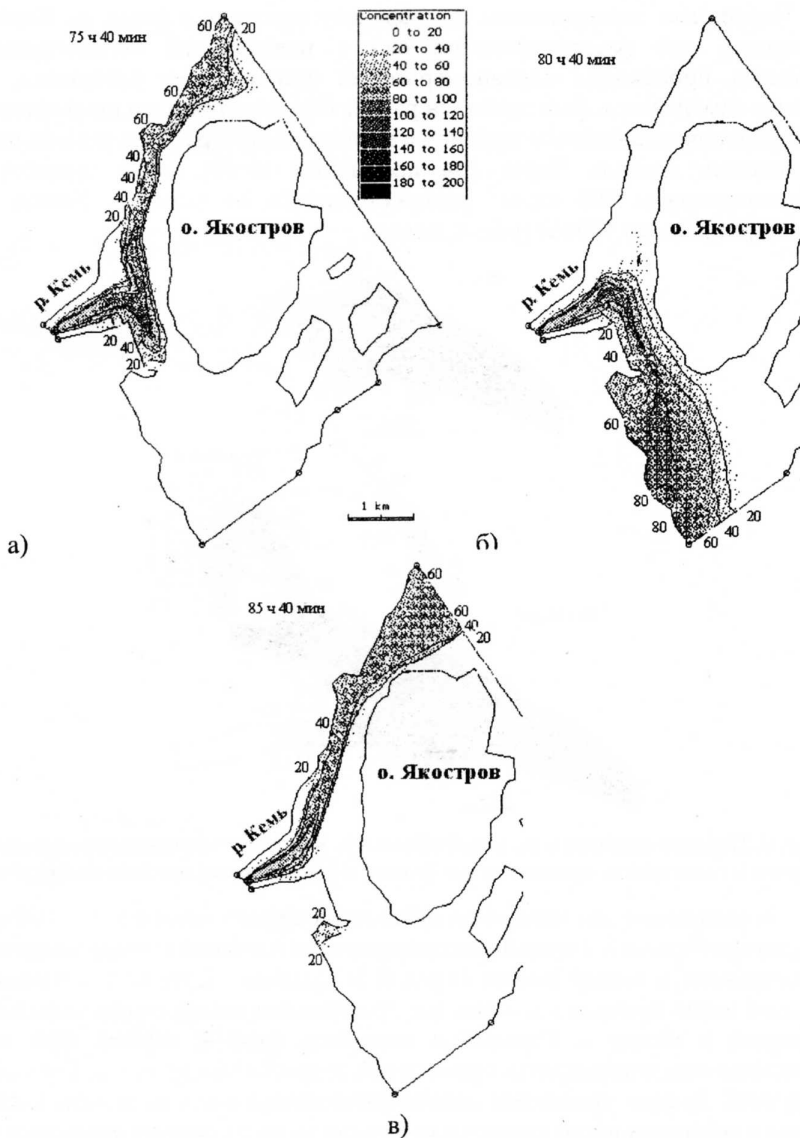


Рис. 3. Изменение положения пятна примеси в приустьевой области р. Кемь в течение одного приливо-отливного цикла.

Численные эксперименты по переносу примеси в устье р. Кереть показали, что распространение вод с повышенной концентрацией примеси происходит неравномерно: на приливе оно ускоряется, на отливе замедляется. Был проведен расчет переноса примеси по акватории при условии сизигийного прилива и максимального расхода реки за семь приливных циклов. Через три приливных цикла пятно примеси с концентрациями $100 \text{ ед.}\cdot\text{м}^{-3}$ распространяется от устья р. Кереть на расстояние около 1500 м (рис. 4, слева).

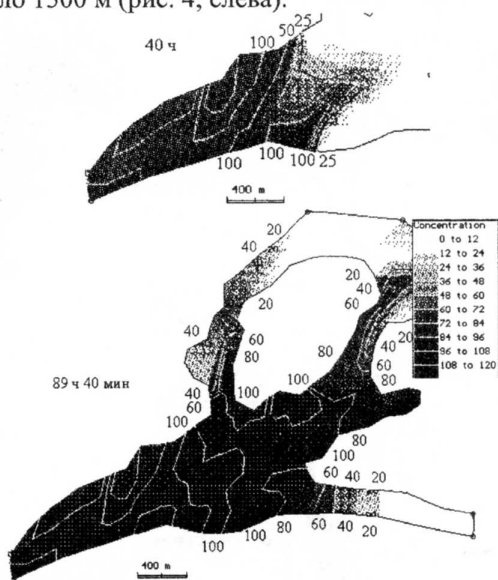


Рис. 4. Перенос примеси в устьевой области р. Кереть при максимальном расходе реки и сизигийном приливе за три (слева) и семь (справа) приливных циклов.

За следующие два приливных цикла пятно продвигается еще на 1000 м и, достигнув берегов о. Горелый, распространяется в проливах между материком и островами и между о-вами Горелый и Средний. Через семь приливных циклов пятно примеси заполняет все пространство между о-вами Горелый и Средний и между о. Горелый и материком (рис. 4, справа). При этом максимальные концентрации примеси наблюдаются между о-вами Горелый и Средний. За семь приливных циклов после начала счета на момент полной воды в акватории пятно удаляется от источника на расстояние около трех км. Проведенный расчет показал, что наиболее интенсивный перенос примеси имеет место в случае задания максимального расхода реки. Выбор же условий сизигийного или квадратурного прилива не оказывает существенного влияния

на перенос примеси. Таким образом, в устье р. Кереть определяющее влияние на перенос примеси имеет расход реки.

В бухте Никольской в качестве источников примеси рассматривались мидиевые плантации. Создание промышленной марикультуры двустворчатого моллюска мидии (*Mutilus edulis*) было начато на Белом море в 1983 г. (Океанографические условия..., 1991). По биотехнологии, разработанной ЗИНОм, в настоящее время под мидиевые хозяйства уже освоено около 50 га водной поверхности. Одна из основных проблем марикультуры мидии – ее экологическая безопасность для окружающей среды. Мидиевые хозяйства оказывают существенное влияние на экосистему акватории. Под мидиевыми плантациями происходят изменения донного сообщества, а при определенных неблагоприятных гидрологических условиях могут появляться заморные зоны. Модельные расчеты показали, что перенос примеси приливными течениями по акватории бухты Никольской незначителен.

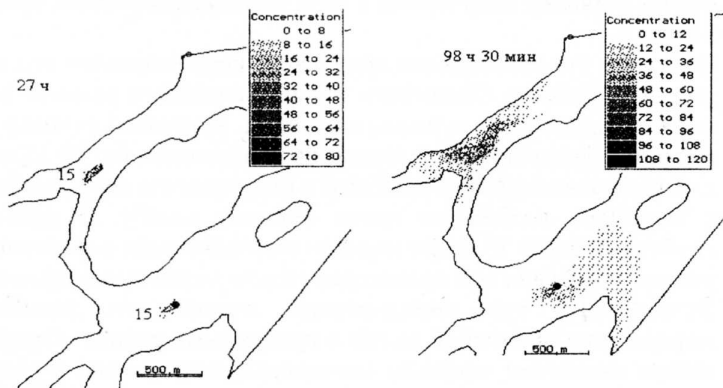


Рис. 5. Перенос примеси по акватории бухты Никольской за два (слева) и восемь (справа) приливных циклов.

Максимальное удаление примеси от источника в губе Никольская меньше, чем в губе Осечкова, в обеих губах оно не превышает 600 м за восемь приливных циклов (рис. 5). В губе Никольская пятно примеси имеет округлую, а в губе Осечкова вытянутую форму. В губе Осечкова пятно примеси со временем распространяется к берегу, в губе Никольская – к выходу из бухты. Поскольку перенос примеси в течение нескольких приливных циклов приливными течениями незначителен, можно сделать вывод о том, что со временем будет происходить накопление примеси в непосредственной близости от источника.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные в диссертации. Показано, что характер переноса примеси как в районах со значительными скоростями приливо-отливных течений (Онежский залив), так и с малыми их значениями (Кандалакшский залив) определяется в первую очередь степенью развития остаточной приливной циркуляции в акватории и величиной расхода реки (для приустьевых областей). При этом наиболее значительное удаление примеси от источника наблюдается в устьях рек Онеги и Керети. В устье р. Кеми, не смотря на большие скорости приливо-отливных течений, удаление пятна примеси от источника незначительно в связи со слабым развитием остаточной приливной циркуляции. При этом концентрации в пятне примеси постепенно растут. В бухте Никольской происходит накопление примеси в непосредственной близости от источника, поскольку скорости приливо-отливных течений незначительны, остаточная приливная циркуляция слаба и объем речного стока в бухту мал.

Основные **выводы**, полученные в ходе выполнения работы, состоят в следующем:

1. Показано, что особенности приливного перемешивания вод в приустьевых районах Онежского и Кандалакшского заливов Белого моря определяются глубиной акватории, величиной речного стока и стратификацией водной толщи: на мелководьях (до 10-15 м) речные воды и взвешенные вещества в фазу прилива перемешиваются с морскими водами по всему водному столбу. В районах с глубинами более 15 м при наличии стратификации перемешивание речных и морских вод происходит только в слое выше термоклина.
2. Установлено, что определяющее влияние на нелинейную деформацию приливной волны в прибрежных районах Онежского залива оказывают эффекты мелководья, вступающие в силу при сравнимости приливного возвышения уровня с глубиной. Нелинейность конвективных ускорений и донного трения играют при этом второстепенную роль.
3. Установлено, что при постоянно действующем в устье р. Онеги источнике примеси характер ее переноса определяется расходом реки: в условиях паводка происходит существенный перенос примеси от источника (на 18, 33 и 43 км за 1, 6 и 16 суток соответственно) и формирование вытянутого по нормали к берегу пятна с повышенными концентрациями примеси. При среднегодовом расходе р. Онеги происходит перенос примеси на расстояние около 10-12 и 15-16 км за 1 и 6 суток соответственно,

- после чего удаление примеси от источника приостанавливается, происходит ее накопление в прибрежной зоне.
4. Выявлено, что в устье р. Керети определяющее влияние на перенос примеси оказывает величина расхода реки (скорости стокового течения превосходят $15-20 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, в то время как скорости приливных течений не превышают $10 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ на большей части акватории).
 5. Показано, что при постоянно действующем источнике примеси в устье р. Кеми, в связи с тем, что в акватории остаточная приливная циркуляция слаба (скорости приливных течений составляют $50-75$, остаточных приливных – менее одного $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$), накопление примеси происходит в узкой прибрежной зоне в непосредственной близости от источника.
 6. Показано, что в бухте Никольской перенос примеси от источника незначителен (не превышает 500 м за трое суток) в силу малости скоростей приливных (не более $20 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) и остаточных приливных течений (менее $1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$). При постоянно действующем источнике примеси ее накопление происходит в непосредственной близости от источника.
 7. Показано, что в вершине Онежского залива при кратковременном поступлении общего фосфора (в течение суток) учет коэффициента неконсервативности общего фосфора целесообразен при расчетах поля его концентраций на срок более двух суток (разница в концентрациях с учетом коэффициента неконсервативности и без достигает 30 и 50% к концу вторых и третьих суток соответственно).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Здоровеннов Р.Э., Лифшиц В.Х., Фукс В.Р. Приливные движения и перенос примеси в эстуарии реки Онеги // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 5. С. 680-685.
2. Здоровеннов Р.Э., Мичурин А.Н. Численное моделирование приливного переноса загрязняющих веществ в вершине Онежского залива Белого моря // *Сб. науч. тр. «Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность»*. Апатиты. 2001. С. 221-228.
3. Dolotov Yu. S., N. N. Filatov, N. N. Nemova, V. P. Shevchenko, N. A. Rimskii-Korsakov, N. V. Denisenko, I. P. Kutcheva, A. N. Platonov, L. L. Demina, R. E. Zdorovenov, and V. N. Kovalenko. Studies of the Water and Suspended Matter Dynamics, Anthropogenic Pollution, and

Ecosystem Living Conditions in the Estuaries (from the Example of the Karelian Coast of the White Sea) // *Oceanology*. Vol. 42. Suppl. 1. 2002. P. S135-S147.

4. Филатов Н.Н., Долотов Ю.С., Бояринов М.П., Здоровеннов Р.Э., Коваленко В.Н., Лифшиц В.Х., Пальшин Н.И., Петров М.П., Толстикова А.В. Исследование термогидродинамических процессов и полей прибрежной зоны и эстуариев Белого моря // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск, 2003. С. 15-24.
5. Здоровеннов Р.Э., Мичурин А.Н. Численное моделирование приливного переноса загрязняющих веществ в Онежском заливе Белого моря // Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура. Материалы международной конференции. Архангельск, Институт экологических проблем Севера УрО РАН. 2000. С.88.
6. Здоровеннов Р.Э. Влияние приливной циркуляции на экологическую ситуацию в районе мидиевых плантаций в губе Никольская Кандалакшского залива белого моря // XIV Коми республиканская молодежная научная конференция (Том 2). Актуальные проблемы биологии и экологии: Тез. докл. VII Молодежной научной конференции. Сыктывкар. 2000. С. 82.
7. Здоровеннов Р.Э., Мичурин А.Н. Численное моделирование приливного переноса загрязняющих веществ в вершине Онежского залива Белого моря // Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность. Тез. докл. международной конференции (Мурманск, 11-13 мая 2000 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2000. С. 67.
8. Филатов Н.Н., Бояринов П.М., Здоровеннов Р.Э., Коваленко В.Н., Литвиненко А.В., Петров П.М., Платонов А.В., Тержевик А.Ю., Толстикова А.Н., Поздняков Д.В., Филатов А.Н., Дружинин П.В. Оценка изменений Белого моря и его водосбора под влиянием климатических и антропогенных изменений // Материалы международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения». ИЭПС. Архангельск. 2002. Т. 1. С. 403-408.

Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99. Подписано в печать 17.11.04. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 1,4. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Изд. № 73. Заказ № 455

Карельский научный центр РАН
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50
Редакционно-издательский отдел