

**МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ,
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 551.465:556.536

Шильнев Андрей Владимирович

**МАССООБМЕН И СТРУКТУРНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПЛОТНОСТНОМ ПОТОКЕ**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре физики моря и вод суши физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор физико-математических наук Б. И. Самолубов

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук В.В. Жмур

доктор физико-математических наук А.Г. Костяной

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Институт Водных Проблем РАН

Защита состоится «5» апреля 2007 г. в ___ час. ___ мин. на заседании Диссертационного совета Д 501.001.63 в Московском Государственном Университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ауд. ____ .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «__» марта 2007 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 501.001.63

кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

В диссертации представлены результаты гидрофизических экспериментальных и теоретических исследований массообмена в стратифицированных придонных плотностных течениях с внутренними линзами и фронтальными зонами. Дан анализ структурных преобразований гравитационных, градиентных и циркуляционных стратифицированных течений по их длине, глубине и во времени. Приведены разработанные математические модели течений и переноса примесей с учетом особенностей обмена в сдвиговых слоях и ядре потока, а также результаты апробации теоретических методик по репрезентативной базе данных натурных измерений.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Плотностные потоки, устойчивость границ и динамика которых определяется разностью плотностей жидкостей в толще течения и над ним, отличаются активным воздействием на дно и окружающие воды. Подобные потоки с термической, соленостной и суспензионной стратификацией в зонах их действия вносят значительный вклад в динамику вод озер, водохранилищ и морей. Эти течения могут оказывать существенное влияние на процессы формирования качества воды. Для прогноза данных и ряда других практически важных процессов в природных бассейнах необходимы методы теоретического описания стратифицированных потоков. Поэтому плотностные течения привлекают внимание специалистов, работающих в фундаментальных и прикладных областях, связанных с исследованиями динамики придонных вод. Из обзора публикаций по этой проблеме следует, что их количество неуклонно возрастает за счет появления работ, посвященных изучению механизмов развития, математическому моделированию течений и переноса примесей.

С фундаментальными проблемами исследований придонных плотностных потоков связаны задачи гидроэкологии, нефтегазодобычи, освоения рудных полезных ископаемых океана, прокладки подводных коммуникаций и гидротехнического строительства.

Вместе с тем, остается не вполне ясным ряд особенностей природы придонных стратифицированных течений, что обусловлено прежде всего зависимостью характеристик этих потоков от изменения окружающих условий. Плотностные течения могут менять структуру, ускоряться или замедляться за счет процессов их взаимодействия с дном и окружающей водной средой. Ситуация дополнительно осложняется из-за спорадичности появления потоков, вызванных интрузиями жидкости повышенной плотности в водоем. В мелководных районах водохранилищ, озер и морей усиливаются недостаточно изученные процессы взаимодействия плотностного потока с дрейфовым. Сохраняется уникальность данных натурных исследований, необходимых для выявления закономерностей развития течения в его ядре, сдвиговых слоях и

фронтальных зонах. В связи с этим, осложняется выявление механизмов диффузии примесей в плотностных потоках. Для решения отмеченных проблем проводится интенсивное изучение стратифицированных течений в натуральных и лабораторных условиях. Тем не менее, методы расчета таких потоков, порой катастрофически мощных, пока далеки от необходимой степени совершенства. Наиболее эффективны исследования, в которых сочетаются структурные натурные измерения и математическое моделирование плотностных течений с учетом их взаимодействия с вышележащими водами.

Итоги выполнения такой комплексной программы экспериментальных и теоретических работ по изучению гравитационных, градиентных и циркуляционных придонных стратифицированных потоков различной природы приведены в диссертации. Анализируются данные исследований структур полей скорости, температуры и концентраций взвешенных и растворенных примесей, разрабатываются математические модели течений и массопереноса.

ЦЕЛИ РАБОТЫ:

- ✓ Выявление закономерностей воздействия стратифицированных потоков с внутренними фронтальными зонами и линзами повышенной плотности на распределения примесей в водохранилищах и озерах
- ✓ Расшифровка механизмов влияния локальных эффектов изменения устойчивости течений в разных слоях водоема на энергопередачу от приповерхностного потока к придонному
- ✓ Разработка математической модели тепло- и массопереноса в придонном стратифицированном потоке для описания эволюции вертикальных распределений температуры и концентрации взвеси с учетом взаимодействия сдвиговых слоев течения.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ. С применением специальных приборов и методик получены не имеющие аналогов по содержанию, объему и детальности данные об эволюции структур одиннадцати плотностных течений с внутренними линзами и фронтальными зонами в 7 водохранилищах и озерах. Выявлены закономерности структурных преобразований течений и распределений примесей. Выявлены условия усиления энергопередачи в придонное плотностное течение из вышележащих слоев и получены зависимости для оценки такого ускорения потока при изменениях интегральной устойчивости течения по всей глубине к ветровому воздействию. Разработаны и проверены по репрезентативной базе данных новые методы математического

моделирования течений и переноса примесей с учетом особенностей обмена в сдвиговых слоях и ядре потока.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Характеристики аппаратуры по пространственно-временному разрешению, стабильности параметров и калибровок измерительных систем, а также методики натуральных экспериментов, обработки и анализа данных обеспечивают надежность результатов измерений. Оценки погрешностей измерений свидетельствуют о достоверности и высокой степени обоснованности научных положений и выводов.

Выявленные закономерности надежно воспроизводятся при анализе и сопоставлении данных, зарегистрированных в ходе экспедиционных исследований на разных полигонах.

Достоверность полученных теоретических выводов и аналитических решений подтверждается их согласием с материалами из репрезентативной базы данных, сформированной в этой работе, и с результатами других измерений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Полученные результаты измерений и выводы о механизмах развития стратифицированных течений, разработанные модели для расчета плотностных потоков, а также распределений концентраций примесей могут быть применены в решениях задач гидроэкологии, при проектировании и эксплуатации гидросооружений, а также при изучении и моделировании аналогичных процессов в водохранилищах, озерах и морях.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

1. Развитие линзового течения в его фронтальной зоне определяется волновыми флуктуациями гидродинамического давления, а в центральной части потока сопровождается эмиссией загрязнений в вышележащие слои. Предложенная модель этого течения проверена по данным измерений в сериях последовательных зондирований.
2. Энергопередача в придонное плотностное течение из вышележащих слоев усиливается при прохождении в потоке задних фронтов холодных линз и внутренних волн. Эти эффекты учитываются найденными зависимостями скорости потока от интегральной устойчивости течения к ветровому воздействию для основных механизмов энергопереноса через термоклин.
3. Для теоретического описания тепло- и массопереноса в плотностном течении эффективна математическая модель, построенная на базе гипотезы взаимодействия сдвиговых слоев. Модель проверена по данным натуральных

исследований эволюции вертикальных распределений концентрации взвеси и температуры воды в 11 придонных стратифицированных течениях различной природы. Учитываются все основные типы зарегистрированных преобразований профилей концентрации.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. По результатам работы сделаны доклады на 19 всероссийских и международных конференциях. В том числе: на 4-й международн. науч. конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей» (1999, 2004); на международн. науч. конф. «Динамика атмосферы и океана» (1995); на всерос. науч. конф. «Воробьевы горы - 95» (1995); на международн. науч. конф. «Физические процессы на океаническом шельфе» (1996); на 1-й всерос. науч. конф. «Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера» (1996); на всерос. науч. конф. «Физические проблемы экологии (физическая экология)» (1997, 1999, 2001, 2004); на международн. науч. конф. «Стационарность и нестационарность стратифицированных и/или вращающихся потоков» (1997); на 3-ем международн. конгрессе «Вода: экология и технология». ЭКВАТЭК-98. (1998); на международн. симп. памяти К. Федорова «Океанические фронты и сопутствующие явления» (1998); на международн. науч. конф. «Стохастические модели гидрологических процессов и их приложения к охране окружающей среды» (1998); на 2-й всерос. научн. конф. «Фундаментальные проблемы физики» (2000); на международн. конф. «Fluxes and structures in fluids» (2001, 2003, 2005); на всерос. конф. «Актуальные проблемы водохранилищ» (2002); на международн. конф. «Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии» (2003).

ПУБЛИКАЦИИ.

Результаты диссертации представлены в 23 научных публикациях.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Автор диссертации выполнил работы по модернизации измерительного комплекса аппаратуры. Принимал непосредственное участие в подготовке и проведении натурных исследований на Истринском (1999, 2002 г.), Вазузском (2001 - 2002 гг.), Иваньковском (1998 г.) водохранилищах и озерах Имандра (1999 г.) и Телецком (2003 г.). Анализ результатов выполнен лично и совместно с научным руководителем.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложенных на 196 страницах, и содержит 85 рисунков. Список используемой литературы включает 151 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении сформулированы цели работы, приведены характеристики актуальности, фундаментальной важности и современного состояния решаемой проблемы, дана постановка задач исследований, рассмотрены пути и методы решения проблемы, основные результаты и сведения об апробации работы, представлены структура и краткое описание содержания диссертации.

Первая глава – «Обзор результатов исследований массообмена в плотностных течениях» - содержит анализ опубликованных результатов экспериментальных исследований стратифицированных течений (раздел 1.1) и методов теоретического описания плотностных потоков (1.2). Рассмотрены работы по изучению распространения придонных стратифицированных течений в водохранилищах и озерах. Представлены данные о морских и океанических плотностных потоках. Приведен анализ результатов исследований плотностных течений, индуцированных ветром и внутренними волнами. Рассмотрены данные о развитии стратифицированных потоков, обусловленных термическим режимом водоемов, и результаты лабораторных исследований структурных преобразований плотностных потоков. Дан анализ результатов из ряда работ по математическому моделированию энерго- и массообмена в стратифицированных течениях. Рассмотрены основные уравнения математической модели распространения плотностного потока и модель взаимодействия сдвиговых слоев течения.

В заключении сделаны следующие выводы из обзора:

- Несмотря на активность исследований и значительную роль придонных стратифицированных течений в процессах массообмена в природных бассейнах, сохраняется дефицит данных об одновременных изменениях распределений параметров течений и состава воды по всей глубине водоема. Практически отсутствуют результаты комплексных структурных исследований линзовых плотностных потоков, что затрудняет построение моделей этих течений, в достаточной степени адекватных природным потокам.
- К нераскрытым механизмам развития плотностных течений относятся эффекты взаимодействия этих потоков с приповерхностными. Литературные данные о таких процессах недостаточно детальны для анализа влияния изменений устойчивости течений на разных глубинах на массоперенос, что резко ограничивает возможности математического моделирования.
- Требуют значительного совершенствования методы расчета распределений концентрации взвеси и температуры в нестационарных потоках. Описание этих распределений без учета взаимодействия сдвиговых слоев, по видимому, не имеет больших перспектив.

На основании этих выводов были поставлены задачи для данной работы.

1. Выявить закономерности воздействия стратифицированных потоков с внутренними фронтальными зонами и линзами повышенной плотности на распределения концентраций примесей в водохранилищах и озерах по данным детальным измерениям.
2. Выявить механизмы влияния изменений устойчивости течений в различных слоях водоема на энергопередачу от приповерхностного потока к придонному.
3. Разработать математическую модель тепло - и массопереноса в придонном стратифицированном потоке для описания эволюции вертикальных распределений температуры и концентрации взвеси с учетом взаимодействия сдвиговых слоев течения.

Вторая глава – «Объекты исследований и методика измерений» - включает описание опорных полигонов: Можайского, Вазузского, Истринского, Ивановского, Нурекского водохранилищ, озер Телецкого и Имандра (раздел 2.1). Приведены характеристики измерительных систем, а также особенности методик комплексных натурных исследований, результаты которых представлены в данной работе (раздел 2.2).

Плотностные потоки в Можайском водохранилище, созданном в верхнем течении р. Москвы, обусловлены термической стратификацией и минерализацией речных вод. Длина водохранилища – 28 км, глубина – до 20 м при нормальном подпорном уровне (НПУ), максимальная ширина – 2.6 км. Средний уклон дна – $i_s = 6 \cdot 10^{-4}$. В плане водохранилище состоит из четырех основных областей расширений (плесов), соединяющихся перекатами. Коэффициент водообмена $\sim 1.1 \text{ год}^{-1}$. Скорости стратифицированных течений - до 15 см/с. Эти течения подвержены сильному влиянию дрейфовых, циркуляционных потоков и внутренних волн.

Вазузское водохранилище - сложное четырехлопастное, глубиной при НПУ - 27 м, длиной - 105 км, шириной до 1 км и коэффициентом водообмена 5-6 год^{-1} . Средний уклон дна – $i_s = 2 \cdot 10^{-4}$. Реки, питающие водохранилище: Вазуза, Касня, Осуга и Гжать, нижние части долин которых им заполнены, близки по водоносности. Плотностные потоки – гравитационно - градиентные и циркуляционные с термической и минерализационной стратификацией.

Истринское водохранилище – одно из старейших в Москворецкой водной системе. Максимальная глубина составляет 19 метров при НПУ. Протяженность бассейна - 22,5 км, ширина до 2.5 км. Коэффициент водообмена $\sim 1.3 \text{ год}^{-1}$. Из-за различий температур вод притоков и концентраций растворенных

в них солей появляются ступенчатые распределения плотности и многоядерные профили скорости придонного стратифицированного течения

Иваньковское водохранилище расположено в пределах Верхневолжской низины – крупной равнины, прорезанной долиной р. Волга. Его длина – 120 км, глубина – до 20 м, максимальная ширина – 4 км. Средний уклон дна – $i_s=2 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент водообмена $\sim 8.3 \text{ год}^{-1}$. Течения преимущественно стоковые и дрейфовые. Большую роль в формировании экологической ситуации в этом бассейне играет высокая проточность водохранилища. Плотностные потоки – градиентно-гравитационные. Стратификация - термическая и минерализационная.

Нурекское водохранилище - водоем каньонного типа глубиной до 300 м, шириной 0.5÷5 км и длиной 70 км. Средний уклон дна $i_s=4 \cdot 10^{-3}$. При впадении в этот бассейн горной реки Вахш, ее мутные холодные воды погружаются в глубинные слои водохранилища и формируют мощный гравитационно-градиентный плотностной поток со скоростями до 50 см/с. В весенне - летний период устойчивость и динамика течения с толщинами до 30м обеспечивается преимущественно суспензионной стратификацией.

Озеро Имандра – крупнейший водоем Кольского полуострова. Озеро состоит из трех плесов, соединяющихся между собой проливами. Максимальные глубины достигают 60 м. Протяженность – до 110 км. Ширина – до 6 км. Коэффициент водообмена $\sim 0.52 \text{ год}^{-1}$. Наибольшие скорости ($\sim 20 \text{ см/с}$) отмечаются вблизи проливов. В водохранилище поступают стоки Оленегорского комбината, предприятий «Североникель» и «Апатит». В условиях малой проточности водохранилища значительную роль в процессах распространения загрязнений играют придонные течения.

Телецкое озеро расположено в северо-восточной части Горного Алтая. Среди 50 глубочайших озер мира оз. Телецкое занимает 39 место, входит в Алтайский государственный заповедник и включено ЮНЕСКО в Список объектов мирового наследия. Максимальная глубина – 325 м, длина - 78 км, ширина до 5,2 км. По профилю дна выделяются меридиональный плес с наибольшими глубинами и широтный северо-западный плес с глубинами менее 100 м до истока р. Бия. В озеро впадает около 70 рек, вытекает одна р. Бия. Стратификация вод преимущественно термическая. Наиболее мощные плотностные течения отмечены перед истоком р. Бия из озера.

Исследования проводились на разрезах по всей области действия течений и в сериях зондирований во времени. В ходе измерений одновременно регистрировались детальные профили скорости потока U , температуры воды

T, концентрации взвеси S, растворенных солей C_{dil} , кислорода O_2 а также скорость ветра U_w на высоте 2 м над поверхностью воды.

Характеристики аппаратуры с учетом особенностей комплексных натуральных исследований, результаты которых положены в основу данной работы, приведены в разделе 2.2. В ходе исследований применялся многопараметрический комплекс аппаратуры, который включал:

- градиентную установку для синхронной регистрации скорости течения U роторными датчиками на шести горизонтах в слое толщиной 3 м,
- фотоэлектрический прозрачномер с датчиком температуры,
- зонды фирмы «Эксперт» для измерений распределений электропроводности воды C_{Σ} и концентрации растворенного кислорода,
- измерители направления течения, скорости и направления ветра,
- систему позиционирования (GPS), эхолот и батометры.

Время комплексной съемки профилей U, T, S - 12 мин в слоях толщиной до 20 м с дискретностью 0,5 м. Точности профильных измерений: 3% для скорости с временем осреднения 4 мин. при $U = 10 \div 70$ см/с (при снижении U от 10 до 3 см/с погрешность возрастала до 20%); 0,02 °C для температуры; 1÷5 мг/л при $S=5 \div 3000$ мг/л для концентрации взвеси. Минимальная разрешаемая скорость – 2 см/с. Погрешности измерений концентраций O_2 - 0,1 мг/л, солей C_{dil} (по C_{Σ}) - 1 мг/л.

Анализы проб, отбравшихся одновременно с измерениями T, S, U, C_{Σ} , позволили получить распределения концентраций растворенных примесей. По этим данным и результатам весового анализа проб проводились калибровки кондуктометра по общей минерализации и прозрачномера по концентрации взвеси.

В третьей главе - Массоперенос в линзовом и гравитационном плотностных потоках - исследуется развитие придонных стратифицированных течений, вызванных прохождением холодных интрузий. Приводятся данные структурных натуральных измерений и разработанные математические модели.

В разделе 3.1 дается общая характеристика проблемы исследований линзовых плотностных потоков, анализируются особенности распространения и динамики течений. Рассматриваются термически стратифицированные придонные потоки, обнаруженные при проведении исследований на Можайском водохранилище и озере Имандра. Эти течения с толщинами 2÷5 м со скоростями до 13 см/с были вызваны, соответственно, дождевым паводком и холодной интрузией вод р. Белой.

В ходе анализа данных измерений установлено, что преобразования потока на станции Зурбаган на Можайском водохранилище были вызваны движением вниз по склону холодной придонной линзы протяженностью

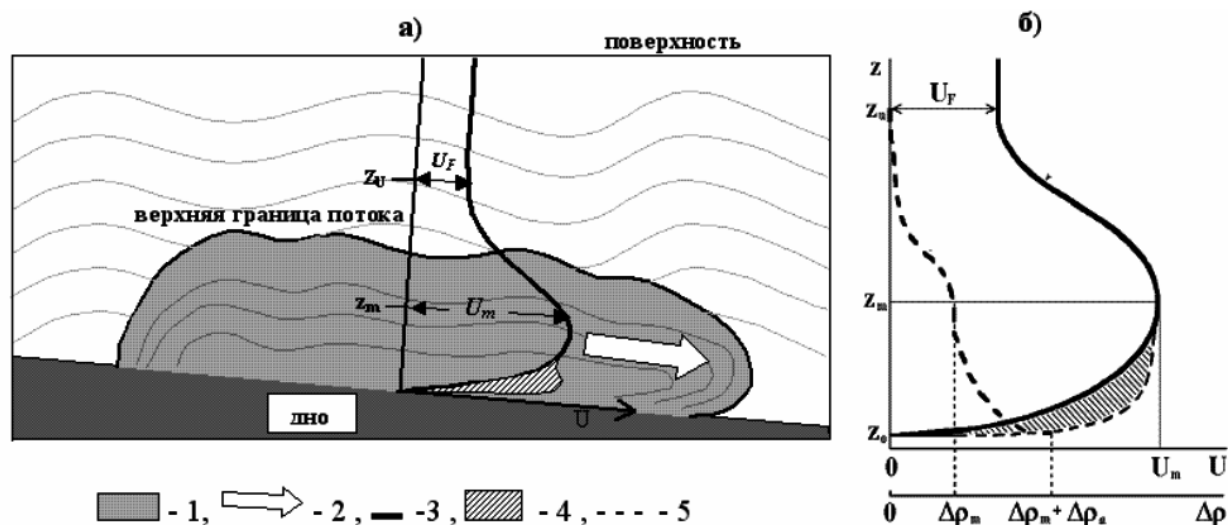


Рис.1. Схемы а - распространения придонной интрузии и б - распределений скорости U и разности плотностей жидкостей $\Delta\rho$ в потоке и над ним по высоте z над уровнем дна. Обозначения: 1 - интрузия, 2 - направление гравитационного потока, 3 - профиль скорости основного течения, 4 - внутреннее течение, 5 - профиль разности плотностей жидкостей в придонном потоке и над ним $\Delta\rho$, $\Delta\rho = \rho(z) - \rho(z_u)$, $\Delta\rho_m = \Delta\rho(z_m)$, $\Delta\rho_a = \rho(z_0) - \rho(z_m)$, z_0 – высота динамической шероховатости, z_u – толщина потока, z_m – уровень максимума скорости $U_m = U(z_m)$, $U_F = U(z_u)$ – скорость течения над придонным стратифицированным потоком

порядка трёх километров (рис. 1). Выявлена эволюция течения в его ядре и задней фронтальной зоне. Внутри основного потока обнаружен вторичный придонный. Зарегистрирован подъем взвеси из придонной области к поверхности. Для теоретического описания данного потока построена и проверена математическая модель нестационарного стратифицированного течения с волновыми флуктуациями гидродинамического давления.

Холодные линзы и облака мутности были выявлены также и в гравитационном стратифицированном придонном потоке малой плотности в губе Белой на озере Имандра (раздел 3.2). Установлено, что формирование таких структур связано с нестационарностью притока (рис. 2а, б). С учетом выявленных закономерностей разработана методика моделирования течения. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемых методов расчета плотностного потока и транспорта взвеси в прогнозах её распространения в аналогичных условиях. Согласно полученным данным, плотностной поток теряет в губе Белой до 30 % поступающей в неё взвеси. Остальные взвешенные примеси переносятся в озеро. Несмотря на сравнитель-

но небольшие значения концентрации взвеси, ее поступление является важ-

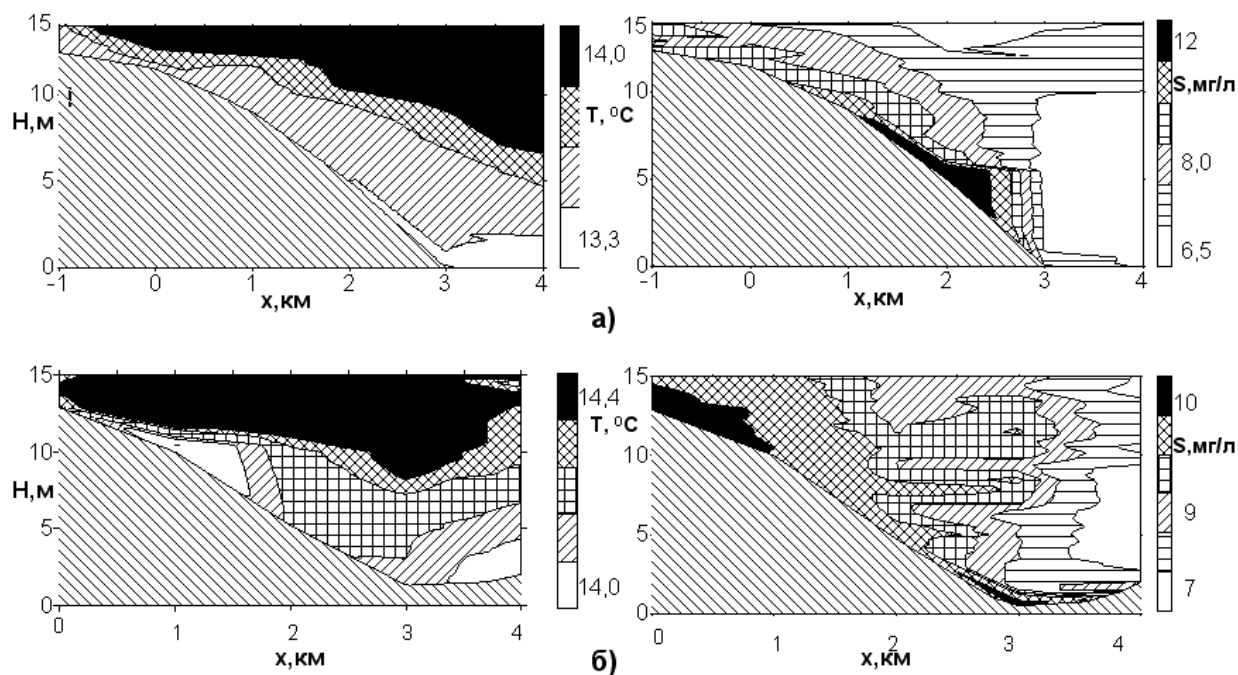


Рис 2а,б. Распределения температуры воды T и концентрации взвеси S в губе Белой (оз. Имандра, 1999) по данным измерений на двух разрезах (в 11ч 30мин ÷ 17ч, 28 июля (рис 2а) и в 19ч ÷ 22ч, 29 июля (рис 2б). По горизонтальной оси на графиках отложено расстояние от устьевого створа ($x = 0$). На первом разрезе (рис 2а) измерения начинались выше устьевого створа непосредственно в реке ($x = -1$ км). По вертикали отложена высота H над уровнем дна в точке с глубиной, максимальной на разрезе.

ным фактором, влияющим на формирование качества воды озера, окруженного предприятиями, стоки которых могут содержать токсичные элементы.

В четвертой главе – «Преобразования полей скорости, температуры и концентраций примесей в гравитационных, градиентных и циркуляционных плотностных потоках» - анализируются распределения параметров течений и состава воды в стратифицированных потоках различной природы по данным детальных структурных измерений на 7 водохранилищах и озерах. В разделе 4.1 дается общая характеристика результатов 14 серий зондирований. Для каждого из потоков рассматривается его природа и приводятся основные параметры. Выделяются диапазоны изменений характеристик течений, эволюция которых изучается в данной и последующих главах. Для глубины водоема H , толщины z_u , средней скорости плотностного потока $\langle \bar{u} \rangle$ и интегрального числа Ричардсона Ri_u эти интервалы составляют: 2 – 30 м, 2 – 20 м, 3 – 32 см/с, 0.2 - 87. Такие диапазоны значений характеристик плотностных потоков свидетельствуют о достаточно широком охвате разнообразных режимов течений указанных типов, которые встречаются как в водоемах

суши, так и в аналогичных по гидродинамическим условиям районах морей. Поэтому приведенные данные об эволюции плотностных течений представляют значительный интерес как непосредственно для выявления механизмов развития таких потоков в озерах и водохранилищах, так и для исследований подобных процессов в морях и океанах.

В разделах 4.2 – 4.4 проведен анализ данных зондирований на 14 срочных станциях. Выделены основные закономерности динамики и структурных преобразований наблюдавшихся плотностных течений. Получены полуэмпирические выражения параметров, характеризующих обнаруженные эффекты. Представлены пространственно-временные распределения характеристик течений, по которым в следующих разделах диссертации выявляются механизмы, и проверяется математическая модель массопереноса. Основные результаты, полученные в ходе проведенного анализа, сводятся к следующим:

1. Обнаружены мигрирующие по глубине ядра (зоны максимумов скорости) придонного стратифицированного течения, возникающие под влиянием внутренней волны. Найдена и представлена аналитически зависимость положений этих ядер от параметров волны и течения.
2. Установлено, что в линзовых течениях к характерным элементам распределений взвеси относятся ступенчатые структуры и максимумы концентраций частиц в слоях смещения, возникающие преимущественно в центральной и фронтальной зонах потока (рис.3).
3. Обнаружена эмиссия загрязнений из плотностного потока в вышележащие слои при прохождении ядра линзы (рис. 3в). Рассмотрены аналогичные явления, зарегистрированные нами в потоке, индуцированном ветром на этой же станции в июле 1999 г, на продольно – осевых разрезах в Можайском и Иваньковском вдхр. (июль 1996 - 1998) и в зоне формирования суспензионного потока в Нурекском вдхр. (август 1981). Отмечено существенное утолщение придонных нефелоидных слоев на участках резкого изменения уклона дна. На передних фронтах возвышений уровня дна толщина потока возросла в 2÷3 раза. Зафиксированы выбросы загрязнений в виде облаков мутности из придонной области течения. Этот эффект эмиссии загрязнений из плотностного потока в вышележащие слои, препятствующий самоочищению вод, должен учитываться при прогнозировании качества воды в водохранилищах.
4. Установлено, что внутренняя волна (с соответствующим запаздыванием) переносит импульс из ускоряющихся ветром приповерхностных слоев воды в ядро придонного стратифицированного потока, формируя положительные возмущения скорости и сопутствующий рост ее градиента в сдвиговых слоях. Получены полуэмпирические выражения параметров этого процесса.

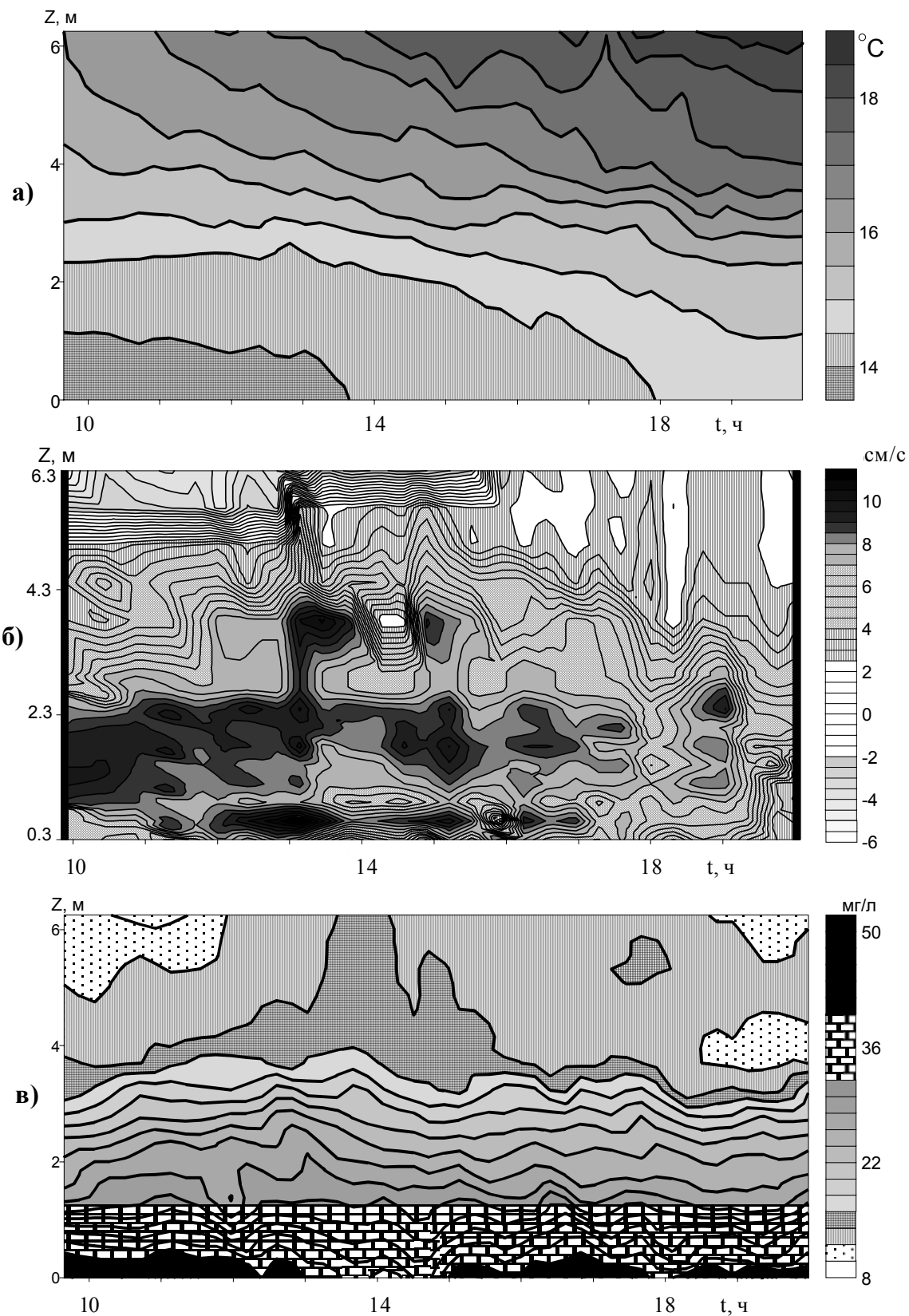


Рис. 3. Распределения а - температуры воды, б - скорости течения и в - концентрации взвеси по высоте над уровнем дна и во времени. (Можайское водохранилище, ст. Зурбаган 1998 г.)

5. Для течения в высокопроточном Иваньковском водохранилище показано, что в среднем за время серии зондирований значения динамической и максимальной скоростей определялись на 50% стоковым градиентом давления, на 26% - ветровым воздействием и на 24% эффектами стратификации.

В разделе 4.5 выделены общие закономерности энергопередачи от приповерхностного течения к придонному. Рассмотрены основные типы механизмов переноса импульса в придонную область по итогам обзорного анализа публикаций. К числу этих механизмов относятся а) турбулентный перенос импульса в глубинные слои без существенных энергозатрат на работу против архимедовых сил при слабой стратификации, б) ускорение придонного потока под действием градиента давления, возникающего при развитии внутренней волны в термоклине за счет усиления дрейфового потока, в) передача импульса через высокоустойчивый термоклин при «клапанном» механизме переноса, г) ускорение придонного потока при развитии двух ячеек циркуляции над термоклином и под ним при ветровом нагоне.

Перечисленные процессы энергопередачи из эпилимниона в гипolimнион существенно зависят от обнаруженных в данной работе важнейших факторов, воздействующих на гидродинамическую устойчивость течений на разных глубинах от поверхности до дна. Для аналитического представления такого многопараметрического процесса в разделе 4.5 рассмотрены зависимости скорости плотностного потока от устойчивости течения по всей глубине водоема к ветровому воздействию. Эта устойчивость характеризуется полным числом Ричардсона $Ri^* = g\delta\rho H / \rho U_{*w}^2$, где $\delta\rho = \rho_k - \rho_{H-0.1}$, $U_{*w} = (\tau_w / \rho)^{0.5}$ - скорость трения и $\tau_w = \alpha_D \rho_A C_{DA} U_w |U_w|$ - напряжение трения на границе вода-воздух, ρ_A - плотность воздуха, C_{DA} - коэффициент сопротивления, α_D - коэффициент, зависящий от степени развития ветрового волнения, влияния берегов и других факторов.

В соответствии с указанными выше механизмами энергопередачи от приповерхностного течения к придонному, результаты измерений на станциях удалось систематизировать, объединив их в три группы.

К первой группе относятся результаты, которым соответствуют кривые $U_m(Ri^*)$, отражающие спадающую зависимость максимальной скорости плотностного потока от полного числа Ричардсона. Подобная связь U_m и Ri^* (практически без запаздывания ускорения течения относительно усиления ветра) характерна для клапанного механизма передачи импульса через высокоустойчивый термоклин. В эту группу вошло 60% всех рассмотренных данных. Получено общее для рассмотренных ситуаций полуэмпирическое выра-

жение скорости плотного потока $U_m / \langle U_m \rangle = 0.3 \langle U_w \rangle_n (Ri^* / \langle Ri^* \rangle)^{A_w}$. Здесь $\langle \dots \rangle$ - знак осреднения по времени выполнения всей серии зондирований, $\langle U_w \rangle_n = \langle U_w \rangle / U_{w1}$, $U_{w1} = 1$ м/с, $A_w = 0.13 \langle U_w \rangle_n - 0.6$.

Вторая группа включает результаты, дающие сходную по виду зависимость $U_m(Ri^*)$, но только со сдвигом чисел Ri^* , по времени на величину, близкую к полупериоду наблюдавшихся флуктуаций скорости ветра и параметров течения. Такое поведение функции $U_m(Ri^*)$ соответствует волновому механизму энергопереноса.

Третий тип зависимости $U_m(Ri^*)$ имеет прямо противоположный характер ($U_m \sim Ri^*$) и наилучшим образом объясняется ускорением плотного потока при развитии двух ячеек циркуляции над термоклином и под ним при ветровом нагоне на плотину водохранилища (рис. 4).

В 90% рассмотренных случаев измеренные значения $U_m / \langle U_m \rangle$ согласуются с указанными аппроксимациями, в пределах 15% -ного среднеквадратического отклонения. Отмеченное соответствие данным измерений в существенно различных течениях с толщинами $z_u = 2-20$ м, средними скоростями $\langle U \rangle = 3-32$ см/с и интегральными числами Ричардсона $Ri_u = 0,2-87$, $Ri^* = 10^2 - 6 \cdot 10^4$ свидетельствует а) о правильности представлений о механизмах энергопередачи из эпителимниона в придонное течение, которые были рассмотрены в ходе проведенного анализа, и б) о возможности применения полученных зависимостей для оценки изменений скорости плотного потока во времени при моделировании аналогичных течений.

Анализ распределений скорости и параметров состава воды по глубине и во времени (раздел 4.4) показал, что влияние усиления скорости приповерхностного течения на придонный поток существенно ограничивается из-за повышения устойчивости течения

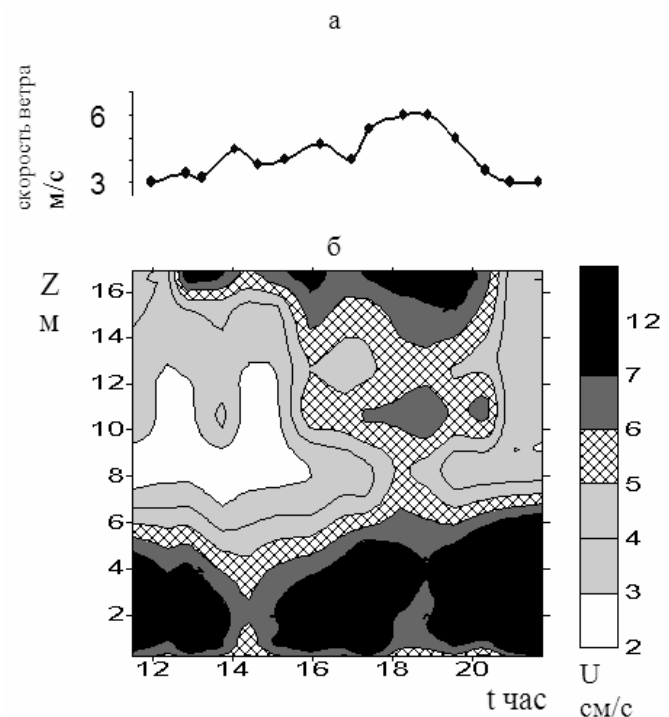


Рис. 4. Распределения а) – скорости ветра во времени и б) - скорости течения U по глубине и во времени, на станции перед плотиной Истринского водохранилища при расходе воды $18 \text{ м}^3 / \text{с}$ (14 июля 2002 г.).

за счет его структурных преобразований. Полученные в данной работе связи скорости плотностного потока с полным числом Ричардсона позволяют учесть эффекты такой блокировки энергопереноса в придонное течение, моментам проявления которой соответствуют пики Ri^* .

Отмеченные эффекты обусловлены прохождением в потоке следующих структурных форм: 1) передних фронтов и вершин холодных зон (линзовой или волновой природы), 2) интервалов между линзами и областей подошв внутренних волн.

Ситуации ускоренного переноса импульса в придонный плотностный поток («прорыва» через термоклин) при одновременном усилении ветра и снижении устойчивости по всей глубине водоема показаны на рис. 5. Таким образом, усиление течения в эпилимнионе за счет стоковых и дрейфовых течений - далеко не единственное условие, необходимое для ускорения придонного течения. Более того, по данным наших наблюдений резкие усиления ветра нередко либо вообще не приводили к ускорению придонного потока, либо вызывали ускорение, значительно меньшее, чем более слабый ветер в моменты снижения устойчивости по всей глубине водоема и в придонном потоке за счет указанных выше факторов. Практически во всех случаях эффект «прорыва» имел место в моменты спада интегральной устойчивости всей толщи вод к ветровому воздействию.

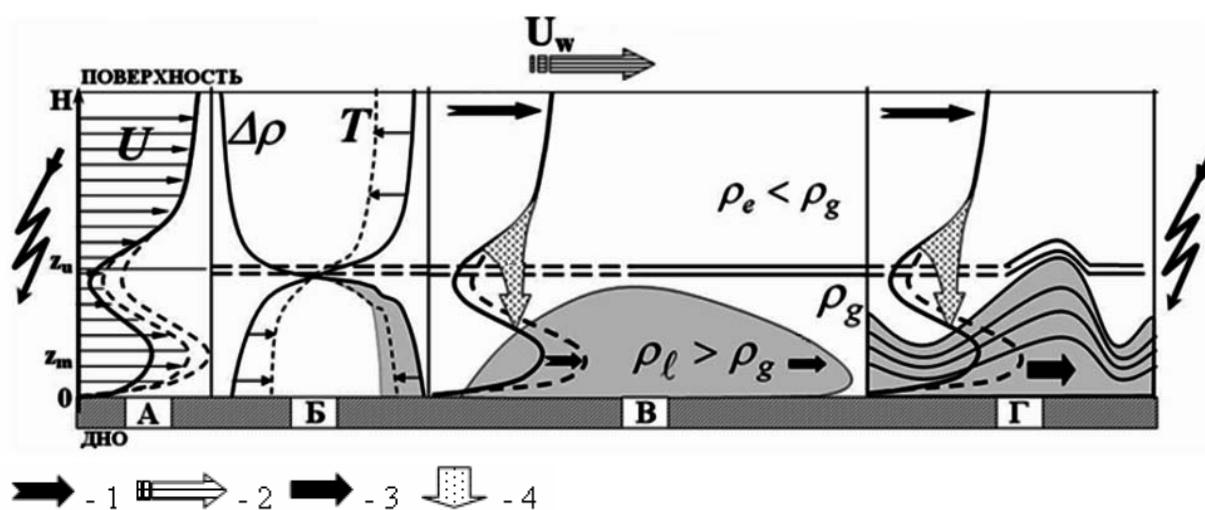


Рис. 5. Схема процесса ускорения плотностного потока (А) за счет передачи импульса из вышележащих слоев воды, включающая основные ситуации усиленной энергопередачи при одновременном росте скорости ветра и снижении устойчивости по всей глубине водоема (Б), прохождении задних фронтов придонной холодной линзы (В) и внутренней волны (Г) (затененные области). На схеме ρ_e , ρ_g , ρ_l - плотности воды в эпилимнионе, гиполимнионе и в холодной придонной линзе; 1, 2, 3 – векторы скоростей придонного и приповерхностного течений, ветра, распространения линзы, 4 – поток импульса из эпилимниона в гиполимнион. Пунктир - профили скорости, температуры воды и разности плотностей в процессе их изменения относительно начальных форм (сплошные линии).

Согласно рис. 6, при ускорении придонного потока на 30 – 70% средней скорости преобладающая часть зарегистрированных «прорывов» совпадает по времени с прохождением задних фронтальных зон внутренних волн или холодных линз.

Следовательно, выявленные гидродинамические условия обеспечивают максимальную вероятность воздействия усилений ветра на придонные плотностные потоки даже при высокоустойчивом термоклине.

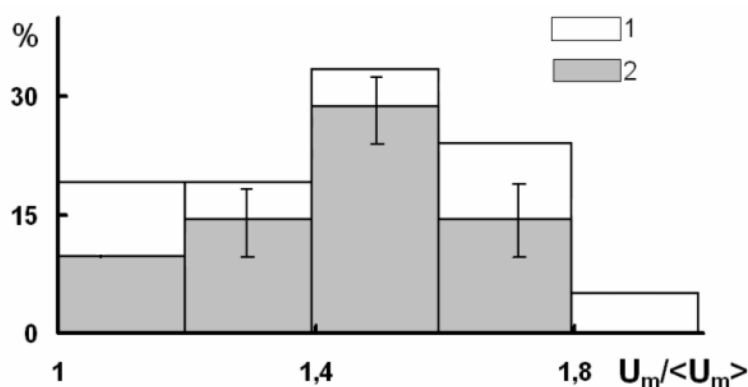


Рис.6. Распределение числа «прорывов» термоклина, сопровождающихся ускорением придонного течения, по значению отношения скорости потока к средней за время серии зондирований. Обозначения: 1 - распределение для всех «прорывов» с $U_m / \langle U_m \rangle > 1$, 2 – в случаях, совпадающих с прохождением задних фронтальных зон внутренних волн или холодных линз.

Глава 5 - «Теоретическое описание распределений температуры и концентраций примесей по модели взаимодействия сдвиговых слоев плотностного потока» - включает результаты разработки и проверки математической модели для расчета профилей удельного содержания взвеси и температуры воды с учетом особенностей обмена в сдвиговых слоях и ядре течения. В разделе 5.1 дается общая характеристика методов моделирования распределений примеси в плотностном течении. Основные идеи модели взаимодействия сдвиговых слоев придонного стратифицированного потока рассматриваются в разделе 5.2.

Согласно представлению о взаимодействии сдвиговых слоев, предлагаемому в данной работе для плотностного течения, потоки примеси из придонного слоя и слоя смешения распространяются до уровней $z_m (1 + \delta_p) \leq z_m^+$ и, соответственно, $z_m (1 - \delta_p) \geq z_m^-$ (рис. 7). Здесь $\delta_p z_m$ - интервал проникновения, находящийся в области взаимодействия с границами $z_m^+ = z_m + \Delta$, $z_m^- = z_m - \Delta$. Относительное время прохождения потока массы через зону $\delta_p z_m$ определяется функцией взаимодействия γ_p . При взаимодействии сдвиговых слоев, области с профилями S , T , соответствующими слоям смешения и придонному, попеременно «вытесняют» друг друга из зоны $z_m \pm \Delta$.

Профили S , T по всей высоте течения z_u получают сшиванием распределений S^-, T^-, S^+, T^+ в слоях $z_m^- \div z_u$ и $z_k \div z_m^+$ в виде:

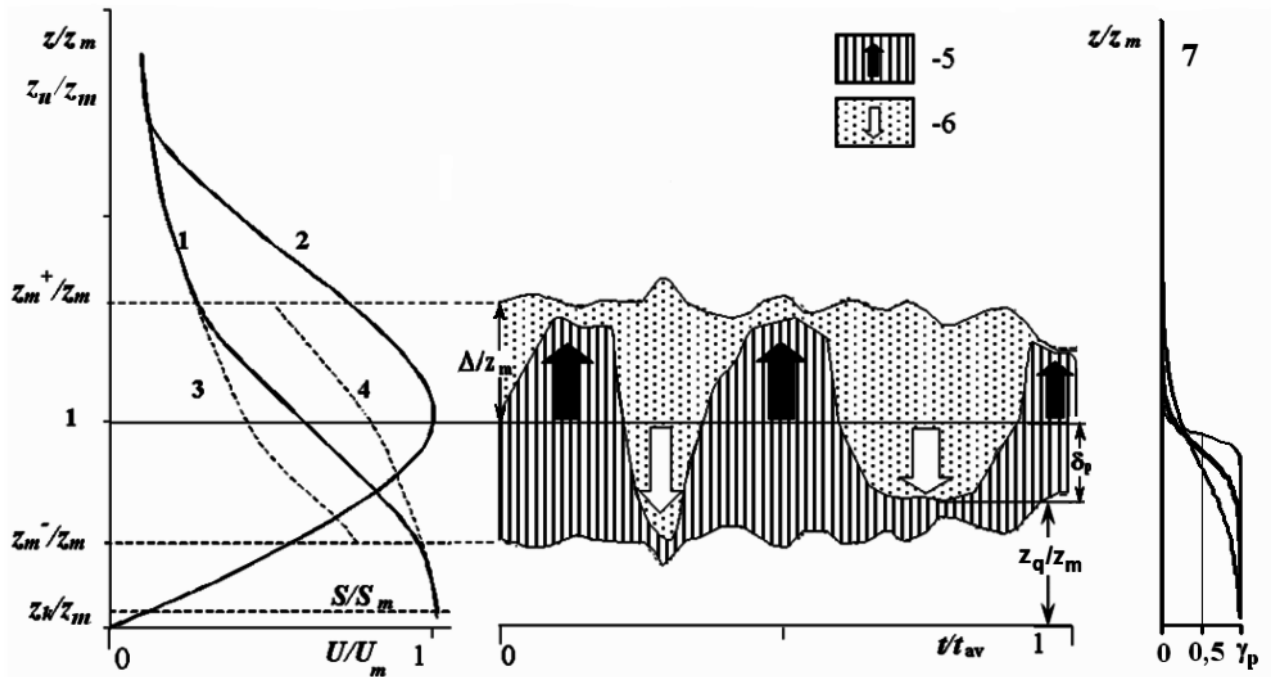


Рис. 7. Схема взаимодействия сдвиговых слоев. Обозначения: 1, 2 - профили скорости U/U_m и концентрации взвеси S/S_m ; 3 и 4 — распределения S/S_m в слоях $z_m^- \div z_u$ и $z_k \div z_m^+$ в отсутствие взаимодействия; 5 и 6 — турбулентные потоки взвеси из придонного слоя в слой смешения и наоборот; δ_p и Δ/z_m - глубина проникновения и толщина слоя взаимодействия, нормированные на высоту максимума скорости z_m ; z_q - равновесный уровень; 7 - профиль функции взаимодействия γ_p из (5.10) для разных z_q ; t_{av} - время съемки профилей концентрации и температуры.

$$S = \gamma_p S^+ + (1 - \gamma_p) S^-, \quad T = \gamma_p T^+ + (1 - \gamma_p) T^- \quad (1)$$

В такой формулировке, гипотеза о взаимодействии, известная для теоретического описания переноса импульса через ядро струи, распространяется на перенос примеси в придонном течении. В отличие от подходов, предлагавшихся ранее, в данной работе учитывается неоднородность профиля функции взаимодействия γ_p , который детально рассмотрен в разделе 5.3.

В соответствии со схемой (рис. 7) и выражением (1), функция γ_p равна 0,5 на равновесной высоте $z=z_q$ и приближается к 0 и к 1, соответственно, при $z > z_m + \Delta$ и $z < z_m - \Delta$. Этим условиям удовлетворяет распределение:

$$\gamma_p = 0.5 \left\{ 1 - th \left(\frac{(z - z_q)}{2(\delta_p + C_\delta)z_m} \right) \right\}, \quad (2)$$

в котором $\delta_p z_m = |z_q - z_m|$; $C_\delta = 3 \cdot 10^{-5}$. Толщина Δ оценивается по (2) при γ_p , близких к предельным: 10^{-2} и 0,99.

Для нормированной глубины проникновения потока массы примеси из одного слоя в другой δ_p , получено полуэмпирическое выражение вида (рис 8)

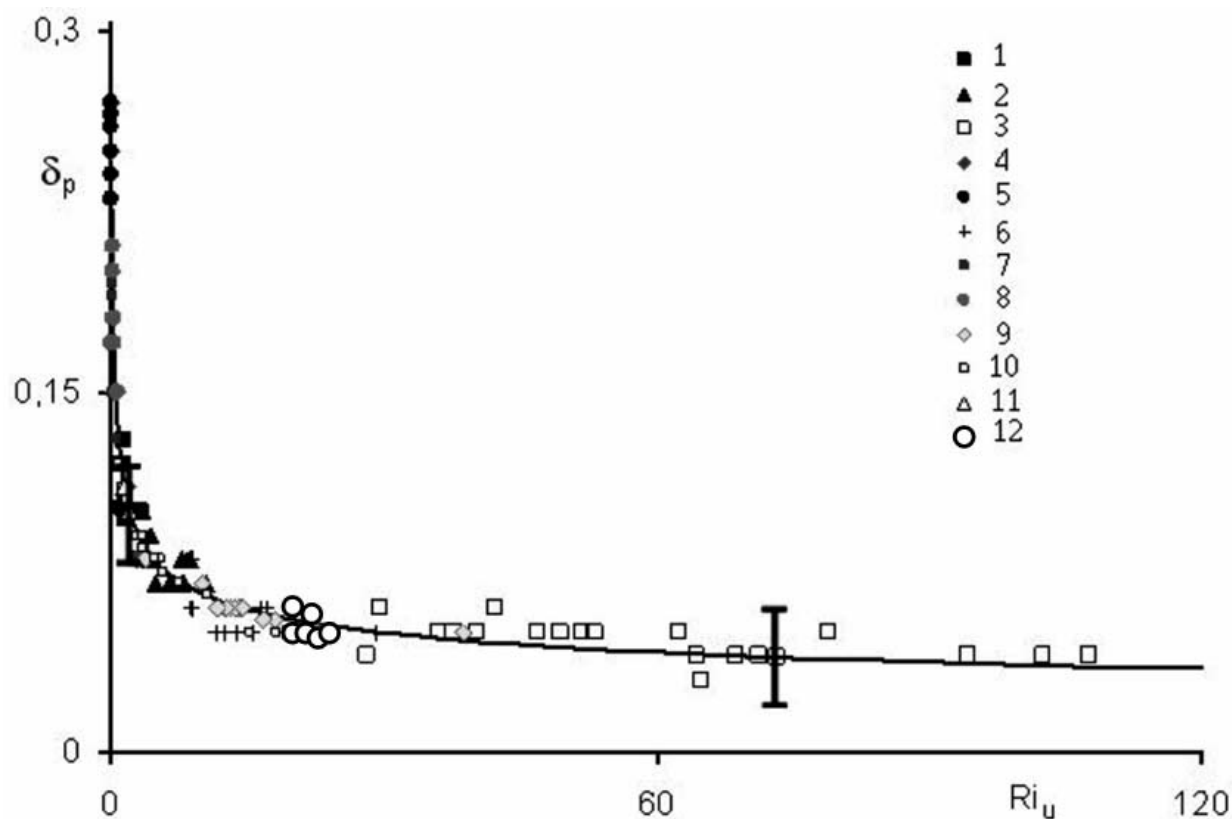


Рис. 8. График зависимости глубины проникновения турбулентного потока примеси δ_p из одного сдвигового слоя в другой от интегрального числа Ричардсона Ri_u . Обозначения соответствуют результатам серий зондирований на водохранилищах Нурекском (1980 г) - 1, Можайском (Поздняковский плёс, 1996 г) – 2 и Истринском (ст. Пятница, 1999 г) – 3, на оз. Телецком (ст. Чулышман, 2003 г) – 4 и (ст. Кара-Таш, 2003 г) - 5, на Вазузском (ст. Карманово, 2002 г) – 6 и Ивановском (ст. Шоша, 1998 г) – 7 водохранилищах, на оз. Имандра (губа Белая, 1998 г) - 8, на водохранилищах Истринском (ст. Плотина, 2002 г) – 9 и (ст. Дьяково, 2002 г) - 10, Нурекском (1981 г) - 11, Можайском (ст. Зурбаган, 1998) - 12. Интервалы – границы стандартного отклонения от графика функции (3).

$$\delta_p \cong 0.15 Ri_H^{-0.4}. \quad (3)$$

По (3), рост устойчивости течения (Ri_H) приводит к уменьшению глубины проникновения потока массы из одного сдвигового слоя в другой ($\delta_p z_m$) за счет гасящего воздействия стратификации на вертикальный обмен. Поскольку такой механизм определяет массоперенос в ядре, то формулу (3) можно назвать законом взаимодействия сдвиговых слоев плотностного течения. Здесь и ниже вводится $Ri_H = g\Delta\rho_H H / \rho \bar{U}^2$ - интегральное число Ричардсона, модифицированное для описания $S(z,t)$, $T(z,t)$ в водохранилищах по $U(z,t)$ и $T(t)$, $S(t)$ при $z=z_k$ и $z=H-0,5$ м, где $\Delta\rho_H = \rho(z_k) - \rho(H-0.5\text{м})$, H – глубина. В большинстве случаев имела место пропорциональность Ri_H и обычного числа Ричардсона для потока в целом $Ri_u = g z_u \bar{\Delta\rho} / \rho \bar{U}^2$, поэтому во всех представ-

ленных выражениях, связывающих параметры модели, допустима взаимозаменяемость этих чисел с точностью до постоянного коэффициента.

С учетом вида функции γ_p получены теоретические вертикальные распределения концентрации взвеси и температуры воды по (1).

Профили S^+ , T^+ из (1) получаются решением уравнения диффузии

$$d_t \varphi - \omega_\varphi \partial_z \varphi = \partial_z (K_\varphi \partial_z \varphi), \quad (4)$$

где t - время, x - расстояние по течению, z - высота над уровнем дна, $\varphi = S, T$; ω_f - гидравлическая крупность; $d_t \varphi = \partial_t \varphi + u \partial_x \varphi + w \partial_z \varphi$ (в рамках плоской задачи); $\omega_\varphi = \omega_f$ при $\varphi = S$ и $\omega_\varphi = 0$ при $\varphi = T$; $k_\varphi = k_s, k_h$. Здесь U и W – продольная и вертикальная компоненты скорости; $k_s = k_u / Sc$, $k_h = k_u / Pr$; Sc и Pr – числа Шмидта и Прандтля, k_u – турбулентная вязкость.

Значение k_u определяется в виде: $k_u = U_\tau^2 / \partial_z U = U_\tau / (2.5/z + 1/L_a)$, где U_τ - сдвиговая скорость, L_a - интегральный масштаб турбулентного обмена, аналогичный масштабу Монина-Обухова и зависящий от устойчивости стратификации. Профиль U_τ находился в приближении линейности вертикального распределения турбулентного напряжения в придонном слое. Выражение $\partial_z U$, полученное из уравнения баланса турбулентной энергии для плотностного потока, соответствует опубликованным результатам предшествующих исследований.

Распределения S и T в слое смешения S^-, T^- из (1) находятся в известных в теории струй приближениях подобия профилей избыточных значений этих характеристик $U-U(z_u)$ и $S-S(z_u)$, $T-T(z_u)$. В итоге, распределения T, S получаются по (1) с компонентами

$$T^+ = T_k + Pr^+ F_Q \cdot I(\zeta) / U_*, \quad T^- = T(z_m^-) + \Delta T_m^- (1 - f_u)^{\alpha_r Pr^-}, \quad (5)$$

$$S^+ = S_k \exp[-\omega_f Sc^+ I(\zeta) / U_*], \quad S^- = S(z_u) + \Delta S_m^- f_u^{\alpha_s Sc^-}, \quad (6)$$

где $I = U_* z_m \int_{\zeta_k}^{\zeta} k_u^{-1} d\zeta$, $\zeta = z/z_m$, $f_u = (U - U(z_u)) / (U_m - U(z_u))$, $f_u = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$, $\xi = |z - z_m^-| / (z_u - z_m^-)$.

Для применения этих распределений найдены полуэмпирические выражения:

- 1) избыточной концентрации взвеси и температуры на нижней границе слоя смешения с учетом гидродинамической устойчивости $\Delta S^-, \Delta T^-$,
- 2) турбулентного потока тепла у дна с учетом его изменения во времени при меняющихся величинах динамической скорости течения и температуры на придонном горизонте F_Q ,

3) чисел Шмидта и Прандтля для слоев смешения Sc^- , Pr^- и придонного Sc^+ , Pr^+ с учетом специфики обмена в этих областях течения (раздел 5.4)

В построенной модели профили концентрации взвеси и температуры воды рассчитываются по (1) с учетом распределений S^+ , T^+ , S^- , T^- (5), (6) и перечисленных выше выражений. Набор входных параметров модели включает распределение скорости и значения концентрации и температуры у дна и на верхней границе течения.

В отличие от подходов, предлагавшихся ранее, разработанный метод позволяет рассчитывать профили концентрации взвеси и температуры с разными знаками локальной кривизны (рис. 9 а), квазиступенчатые (рис. 9 б), с отрицательным вертикальным градиентом (рис. 9 в), а также распределения с максимумами концентрации в слое смешения (рис. 9 г).

Модель апробирована по данным измерений в сериях зондирований на 14 станциях, выполненных на 7 полигонах (примерно по 200 комплексным профилям параметров течения и состава воды). Эти параметры соответствуют диапазонам: $H=2\div 30$ м, $z_u=2\div 20$ м, $\langle U \rangle=3\div 32$ см/с, $\langle Ri_u \rangle=0.2\div 87$, $S=8\div 3000$ мг/л, $T_u-T_k=0.1\div 10^\circ\text{C}$. Разработанная методика теоретического

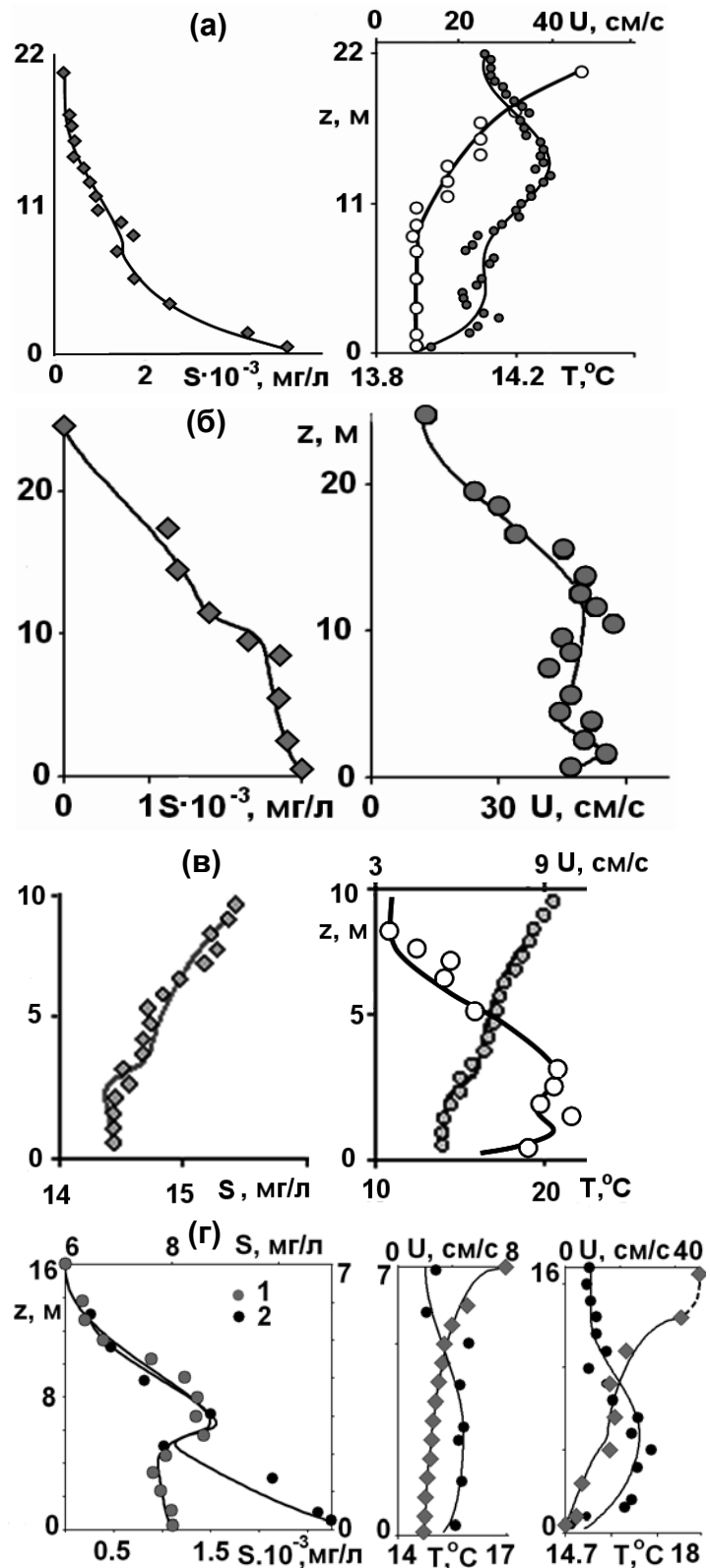


Рис. 9. Сравнение теоретических профилей концентрации взвеси S , температуры T и скорости U с измеренными в плотностных потоках на водохранилищах а, б - Нурекском (25.08.1981, ст. 5; 21.08.1977, ст. 6), в - Истринском (14.07.2002, ст. 10), г - Рузском 1 (28.06.2000, ст. 5) и Нурекском 2 (16.08.1980, ст. 8). На рис 9 г (график $S(z)$) левая и нижняя оси координат относятся к профилю 2.

описания вертикальных распределений $S(z)$ и $T(z)$ в целом отражает преобразования течения в различных его режимах, среди которых выделяются 3 основных:

1. Слабое взаимодействие сдвиговых слоев - уменьшение глубины вторжения потока массы из слоя смешения в придонный при росте устойчивости течения. Формирование квазиступенчатых распределений концентрации в ядре (рис. 9 б).
2. Запирание придонного слоя – снижение динамической скорости, рост градиента концентрации в ядре и появление её пика в слое смешения (рис. 9 г).
3. Сильное взаимодействие - увеличение потоков примеси из слоев смешения и придонного в область их контакта при спаде устойчивости течения. Глубина проникновения потока примеси из одного слоя в другой приближается к максимальной, а профили температуры и концентрации взвеси в ядре - к квазилинейным (рис. 9 а).

Сравнение на рис. 9 проведено с данными измерений распределений U , S , T на отдельных вертикалях в сериях зондирований во времени и на продольных разрезах. Аналогичное сопоставление со всеми профилями, измерившимися в ходе последовательных зондирований на срочных станциях, показало пригодность данной модели для теоретического описания преобразований полей концентрации взвеси и температуры по глубине и во времени.

Расчет эволюции распределений температуры воды и концентрации взвеси проводится при известных в начальный момент времени профилях этих параметров, при заданном распределении скорости и нестационарных граничных условиях.

В Заключение диссертации обобщены основные результаты выполненных исследований.

1. Выявлены преобразования структур полей скорости и концентраций примесей, вызванные прохождением фронтальных зон в 11 градиентных и гравитационных плотностных потоках, включая линзовые, на 7 водохранилищах и озерах.
2. Обнаружены мигрирующие по высоте локальные ядра плотностного течения. Найдена и представлена аналитически зависимость их положений от параметров потока.
3. Выявлена эмиссия загрязнений в виде облаков мутности из плотностного течения на высоту порядка толщины потока под воздействием вихреволновых возмущений, препятствующая самоочищению вод.

4. Установлено, что ускорение придонного потока за счет энергопереноса через термоклин при спаде устойчивости течения по всей глубине к ветровому воздействию максимально в областях задних фронтов холодных линз и внутренних волн.
5. Получены полуэмпирические зависимости скорости плотностного потока от устойчивости течения к ветровому воздействию для основных механизмов энергопереноса через термоклин.
6. Установлено, что изменения ускорения линзового стратифицированного потока в его фронтальной зоне определяются волновыми флуктуациями гидродинамического давления.
7. Разработана математическая модель тепло- и массопереноса в плотностном течении на базе гипотезы взаимодействия сдвиговых слоев. Модель проверена при описании эволюции вертикальных распределений концентрации взвеси и температуры воды. Обеспечивается расчет профилей с разными знаками локальной кривизны и вертикального градиента, с максимумами концентрации и квазиступенчатых.

Результаты диссертационной работы изложены в 23 публикациях:

1. *Стратифицированные течения, внутренние волны и диффузия примесей в водохранилищах* // Вторая всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Москва. 1999. Тез докл. С.67-68. (соавторы Самолюбов Б.И., Кременецкий В.В., Мойя А.А., Замарашкин А.Л.)
2. *Транспорт примесей плотностными потоками и внутренними волнами при переменном ветре* // Труды V-й конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М. ИВП РАН. 1999. С.40-42. (соавторы Замарашкин А.Л., Самолюбов Б.И., Решетков А.Б., Мойя А.А.)
3. *Gravity current induced by runoff in reservoir* // Int. conf. "Fluxes and structures in fluids" St. Petersburg.1999. Abstracts of the Reports.P.110-111. (соавторы Samolyubov B.I., Kremenetskiy V.V., Sluev M.V.)
4. *Динамика интрузионных плотностных течений* // Вторая всерос. научн. конф. «Фундаментальные проблемы физики», Саратов.: СГУ. 2000. Тез докл. С. 168-169. (соавторы Самолюбов Б.И., Кузнецов И.С.)
5. *Взвесенесущий гравитационный плотностной поток в крупнейшем озере Заполярья с мощной техногенной нагрузкой* // Третья всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Мо-

- сква. 2001. Тез докл. С. 110 - 111. (соавторы Самолубов Б. И., Кузнецов И. С., Замарашкин А. Л., Кременецкий В.В.)
6. *Воздействие линзовых плотностных течений на распространение загрязнений в водоемах* // Третья всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Москва. 2001. Тез докл. С. 57 - 58. (соавторы Афанасьев Е. С., Самолубов Б. И., Звездун К. И.)
7. *Натурные исследования и моделирование гравитационного плотностного взвесенесущего течения* // В сб. «Человечество и береговая зона Мирового океана в 21 веке», Москва, ГЕОС, .: ГЕОС, 2001. С. 207– 216. (соавтор Самолубов Б.И.)
8. *Плотностной поток, вызванный дождевым паводком в водохранилище* // Метеорология и Гидрология. 2001. № 11. С. 58-66 . (соавторы Самолубов Б.И., Слуев М. В., Кременецкий В.В., Мойя А.А.)
9. *Распространение стратифицированных течений в равнинных водохранилищах* // Водные ресурсы. 2001. Т. 26. № 2. С. 148 - 152. (соавторы Самолубов Б.И., Замарашкин А.Л., Кременецкий В.В., Силаев А.В.)
10. *Расчет преобразований профилей температуры воды и концентрации взвеси по модели взаимодействия сдвиговых слоев придонного течения* // Третья всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Москва. 2001. Тез докл. С.99 - 100. (соавтор Самолубов Б. И.)
11. *Расчет профилей концентрации взвеси и температуры воды в плотностном потоке методом взаимодействия сдвиговых слоев* // «Потоки и структуры в жидкостях». Избранные доклады Международной конф. “Fluxes and structures in fluids”. М. 2001. Изд. М.: ИПМ РАН, 2002. С. 360-366.
12. *Evolution of the profiles of the water state parameters as a result of the shear layer interaction in stratified flow* // Int. conf. “Fluxes and structures in fluids” Moscow.2001. Abstracts of the Reports. P.180-181. (соавтор Samolyubov B.I.)
13. *Propagation and structures of stratified currents with internal higher density lenses and fronts* // Int. conf. “Fluxes and structures in fluids” Moscow.2001. Abstracts of the Reports. P.181. (соавторы Samolyubov B.I., Zamarashkin A.L., Afanasjev E.S., Zvezdun K.I.)
14. *Вертикальный теплообмен в водохранилищах с циркуляционными и стоковыми стратифицированными течениями* // Всерос. конф. «Актуальные проблемы водохранилищ». 2002, Борок, ИБВВ РАН. - Ярославль. 2002. Тез докл. С. 16 - 17. (соавторы Ардашева М. Е., Самолубов Б.И.)

15. *Взаимодействие сдвиговых слоев и распределение примесей в плотностном потоке* // Юбилейная Всероссийская конференция «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». М. МГУ. 2002. Тез докл. С. 247- 248.
16. *Плотностной поток и перенос примеси в губе Белой на озере Имандра* // Гидротехническое строительство. 2002. № 10. С. 46 – 49. (соавторы Самолюбов Б.И., Кузнецов И.С., Кременецкий В.В.)
17. *Эволюция вертикальных распределений температуры и концентраций примесей в водохранилищах с циркуляционными и стоковыми стратифицированными течениями* // Материалы междунардн. научно-практической конф. «Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии». Минск. БГУ . 2003. С. 383 – 385. (соавторы Ардашева М. Е., Самолюбов Б.И.)
18. *Energy mass exchange and diffusion in density flow with interaction of shear layers* // Int. conf. “Fluxes and structures in fluids”. St. Petersburg. 2003. Abstracts of the Reports. P.12-14 (соавторы Ardasheva M.E., Samolubov B.I.)
19. *Модель взаимодействия сдвиговых слоев и описание массообмена в плотностном течении* // Вестник МГУ. Серия Физика и Астрономия. 2004. № 4. С. 52 - 56. (соавтор Самолюбов Б. И.)
20. *Эволюция полей температуры и концентраций примесей в водоёмах с придонными плотностными течениями* // Четвертая всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии». М. МГУ. 2004. Тезисы докладов. С. 85 - 86.
21. *Эволюция придонных течений и вертикальный турбулентный обмен в стратифицированных водохранилищах* // Труды VI конференции ««Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: ИВП РАН. 2004. С. 107 - 110.
22. *Формирование распределений параметров состава воды в природных бассейнах с придонными и промежуточными стратифицированными течениями* // Физическая экология. 2004. М.: МГУ. Физический ф-т. 2005. 15 с. (соавторы Самолюбов Б.И., Афанасьев Е.С.)
23. *Stratified currents in the gradient flow at the complex bottom relief* // Int. conf. “Fluxes and structures in fluids”. Moscow. 2005. Abstracts of the Reports. P.98-100. (соавторы Samolyubov B.I., Afanasjev E. S.)