

778 ОД
23 НОЯ 1998.

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 551.465.552

СИЛАЕВА ЛАДА ВАДИМОВНА

**ДИФФУЗИЯ
И СПЕКТРЫ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ВЗВЕСИ
В СУСПЕНЗИОННОМ ТЕЧЕНИИ.**

Специальность 04.00.23 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
1998

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Б. И. Самолубов

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук А. Г. Зацепин
кандидат физико-математических наук Е. А. Орланович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Институт Водных Проблем Российской Академии Наук

Защита состоится " 03 " декабря 1998г. в 15 час. 00 мин.

На заседании Специализированного Совета Д. 053.05,81 по геофизике в Московском
Государственном Университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва,
Воробьевы горы, МГУ, физический факультет, ауд. 5-18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан " 30 " октября 1998г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета,
кандидат физико-математических наук



В. Б. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Плотностные течения, стратифицированные взвесью (суспензионные потоки), играют важную роль в процессах массопереноса в придонных слоях озер, водохранилищ, морей и океанов. Одна из ключевых задач исследований этих потоков – изучение механизмов взаимодействия течения и твердой примеси с учетом преобразований спектров размеров взвешенных частиц.

Выявление связей распределений частиц по размерам со средними и турбулентными характеристиками течения необходимо для создания методики диагностики структуры потока по результатам гранулометрического анализа. Разработка способов аналитического описания спектров размеров частиц и распределений коэффициента турбулентной диффузии составляет базу для моделирования и прогноза переноса взвеси придонными течениями. С фундаментальными проблемами исследований переноса взвесей плотностными потоками связаны задачи гидроэкологии, нефте-газодобычи, освоения рудных полезных ископаемых океана, прокладки подводных коммуникаций и гидротехнического строительства.

Цель работы состояла в решении следующих задач:

1. Получить вертикальное распределение коэффициента диффузии взвеси в суспензионном течении, принимая во внимание особенности турбулентного обмена в слое смешения; ядре потока и в придонном пограничном слое.
2. Разработать методы аналитического описания спектров размеров частиц взвеси с учетом изменения механизмов массообмена по глубине в суспензионном течении.
3. Выявить связи параметров распределений взвешенных частиц по размерам со средними и турбулентными характеристиками течения.

Научная новизна и основные результаты.

Получено распределение коэффициента турбулентной диффузии частиц взвеси по всей толщине придонного плотностного потока. Найденное распределение – “диффузионный триплет” – позволяет учесть специфику процессов турбулентного обмена в сдвиговых слоях и ядре течения. Применение этого аналитического представления коэффициента диффузии при моделировании переноса частиц обеспечивает получение профилей концентрации взвеси с различными знаками локальной кривизны и ступенчатые. Формы теоретических профилей концентрации и соответственно коэффициента обмена преобразуются коренным образом при изменении режима течения. Расшифрована структура поля возмущений концентрации в суспензионном потоке с внутренней волной. Разработана методика восстановления профиля скорости течения по известному распределению концентрации взвеси.

Представлена аналитически в виде суперпозиции четырех составляющих функция распределения частиц по размерам. Каждая из четырех компонент характеризуется соответственно перенос взвеси под влиянием гравитационного оседания, турбулентного обмена, адвективных изменений скорости течения и внутренней волны. Обнаружено, что дополнительные спектральные моды, которые появляются в области крупнозернистых фракций, обусловлены влиянием внутренней волны. Составляющая спектра, связанная с проявлениями волновой нестационарности,

описывается степенной функцией. Показатель этой функции пропорционален вертикальной составляющей скорости внутренней волны.

Разработана и проверена методика диагностики плотностного течения и внутренней волны на базе анализа спектров размеров взвешенных частиц.

Практическая ценность.

Разработанные методы расчета распределения частиц взвеси по размерам, профили коэффициента диффузии, восстановления профиля скорости течения и оценки вертикальной составляющей скорости внутренней волны позволяют вычислять теоретическое описание плотностных взвешенных потоков и проводить диагностику структур этих течений с учетом воздействия на них внутренних волн. Результаты диссертации могут быть применены при прогнозе загрязнения гидросферы естественными и техногенными примесями, в том числе продуктами донной эрозии, которые переносит течение. Особое значение имеет такой прогноз в зонах повышенной опасности загрязнения гидросферы, в районах захоронения радиоактивных отходов и промышленной разработки недр дна океана. К важнейшим областям применения полученных результатов относится также оценка воздействия суспензионных потоков на подводные коммуникации, на распределение донных отложений, загрязнение водохранилищ и судоходных каналов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Четвертой конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей" (Москва, 1994), Конференции "Ломоносовские чтения 1995", Международной конференции "Пограничные эффекты в стратифицированной и/или вращающейся жидкости" (С. Петербург, 1995), Международной конференции "Динамика океана и атмосферы" (Москва, 1995), Международной конференции "Физические процессы на океаническом шельфе" (Светлогорск, 1996), Первой Всероссийской конференции "Взаимодействие в системе литосфера – гидросфера – атмосфера" (Москва, 1996), Международной конференции "Стабильность и нестабильность стратифицированной и/или вращающейся жидкости" (Москва, 1997), Всероссийской научной конференции "Физические проблемы экологии" (Москва, 1997), Международной конференции "Океанические фронты и сопутствующие явления" (С. Петербург, 1998), а также на семинарах ИВП РАН и кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ.

Публикации. Результаты диссертации представлены в 13 научных публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 90 страниц текста, 43 рисунков и 1 таблицу. Общий объем – 135 страниц, включая список литературы из 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении сформулированы цели работы, приведены характеристики актуальности и фундаментальной важности решаемой проблемы.

Первая глава – "Обзор результатов исследований турбулентной диффузии и спектров размеров взвешенных частиц" – содержит анализ представлений

ных в литературе данных исследований спектров размеров части взвеси и методов описания вертикального распределения коэффициента турбулентной диффузии.

В §1 приведены результаты детальных исследований распределений взвешенных частиц по размерам в океанах, морях и водохранилищах. Описаны различные виды спектров размеров частиц взвеси и их преобразования в пространстве и во времени. Из анализа видов распределений частиц по размерам следует вывод о сильной связи форм гранулометрических спектров с механизмами и интенсивностью процессов массообмена в потоке, транспортирующем взвесь.

Представлены основные канонические распределения, применяющиеся для описания экспериментально полученных спектров размеров частиц при решении теоретических и прикладных задач, включая обратные. Показано, что, несмотря на разнообразие этих распределений, они далеко не всегда соответствуют измеренным.

В §2 представлены различные подходы к описанию распределения коэффициента турбулентной диффузии взвеси по высоте над уровнем дна во всей толще течения. Приведены основные полумпирические выражения коэффициента диффузии K_s и часто применяющиеся эмпирические функции $K_s(z)$. Основной недостаток этих распределений - их фиксированная форма, которая существенно ограничивает применение соответствующих моделей, и не адекватна, в достаточной мере, реальным процессам, происходящим в ядре и на границах течения. Среди перечисленных в обзоре подходах выделяется метод linear-bridge, предложенный для плотностных и суспензионных потоков малой плотности. Этот метод состоит в том, что профиль коэффициента диффузии линейно аппроксимируется в интервале между максимумами K_s в сдвиговых слоях. Указанный интервал включает ядро плотностного потока. Такой подход позволяет избежать разрыва в ядре и дает приближенное решение уравнения диффузии, но приводит к ошибкам в расчетах распределения концентрации $S(z)$ в ядре и слое смешения течения.

Обзор завершается выводами, которые определяют важнейшие направления исследований:

1. По результатам гранулометрического анализа спектров размеров частиц может выполняться диагностика структуры течения. Однако для решения данной задачи необходима функция распределения частиц по размерам, которая описывает различные формы этих спектров, с учетом их многомодальности и изменений дисперсий.

2. Из работ, в которых представлены материалы измерений и методы математического моделирования диффузии взвеси в придонных плотностных потоках, следует, что профили коэффициента диффузии в этих течениях намного сложнее существующих модельных представлений. Необходим учет специфики турбулентного обмена в слое смешения, ядре и в придонном пограничном слое.

Вторая глава - "Характеристика объекта, методов и результатов исследований диффузии взвеси в плотностном потоке" - включает описание изучаемых течений, краткие характеристики аппаратуры и методики измерений.

Основная часть анализируемых данных получена при исследованиях суспензионного течения малой плотности ($\Delta\bar{\rho} \leq 3 \times 10^{-3}$ г/см³), в Нурекском водохранилище глубиной до 300 м, шириной и длиной 0,5÷5 и 70 км с уклоном дна $i_s \leq 10^{-2}$. Тол-

щина потока $z_u = 15 \pm 30$ м, скорость \bar{U} до 50 см/с (черта сверху – знак осреднения по высоте z_u), дальность распространения до 30 км. Регистрировались пространственно-временные распределения концентрации S и объемного содержания частиц V_i по их размерам a_i , профили температуры воды T и скорости течения U . Применялась специально сконструированная аппаратура для комплексных градиентных измерений и непрерывного зондирования.

Погрешности измерений $S, T, U: (2 \pm 5) \times 10^{-6}$ г/см³ при $S \leq (0,05 \pm 5) \times 10^{-3}$ г/см³, $0,02^\circ\text{C}$ при $T = 10 - 20^\circ\text{C}$ и 1 см/с при $U = 10 \pm 70$ см/с. Значения V_i при $a_i = 2 \pm 70$ мкм и разбитии на 16 фракций определялись с погрешностями, составившими $(20 \pm 30)\%$ для 14 центральных фракций и порядка 50% для 2-х краевых.

Плотность жидкости определялась как $\rho = (1 - S/\rho_s)\rho_w(T) + S$. Здесь $\rho_w(T)$ и $\rho_s = 2,5$ г/м³ – плотности воды и материала взвеси, $S = \sum_{i=1}^{\Phi} S_i$ – суммарная массовая концентрация, Φ – число фракций.

Гидравлическая крупность взвеси ω_{f_i} с учетом отклонений форм частиц от сферических равна $(0,03 \pm 26)10^{-2}$ см/с при $T = 15^\circ\text{C}$. Гранулометрический состав взвеси изучался на установке Квантимет-720 (Cambridge Instruments). Определялись размеры a_i и фактор формы не менее 6×10^3 частиц в пробе. Всего проанализировано около 3×10^6 частиц.

Контроль точности измерений выполнялся на анализаторе Квантимет по тест-объектам с эталонными размерами. Применялся также метод сравнения интегрального объема пробы, определенного по ее весу и плотности материала, с объемом, найденным по размерам частиц на анализаторе изображений.

В диссертации рассматриваются результаты комплексных натуральных измерений распределений скорости придонного течения, температуры воды, концентрации взвеси и размеров ее частиц вдоль по потоку и в сериях последовательных зондирований на станциях. Анализируются, сопоставляются и моделируются распределения частиц взвеси, полученные в придонных взвесенесущих течениях в Нурекском водохранилище, в водохранилище Кадзурасава, в каньоне р. Конго (Юж. Атлантика), в прибрежной и центральной частях Берингова моря, в районе Гавайских островов (Тихий океан) и на полигоне НЕВВЛЕ (Сев-Зап. Атлантика), а также в экспериментальных в лотках, в лабораториях МГУ и Университета Хоккайдо.

В третьей главе – "Распределение коэффициента турбулентной диффузии" – предлагается новый подход к моделированию диффузии взвеси в турбулентном суспензионном течении. Проводится анализ распределений коэффициента диффузии взвеси $K_s(z)$ во всей толще потока по материалам экспедиционных измерений. Учитывается влияние процессов обмена, развивающихся не только в сдвиговых слоях, но и в ядре потока.

В §1 представлены распределения коэффициента диффузии $K_s(z)$, найденные из уравнения диффузии взвеси по измеренным профилям концентрации $S(z)$. Из

уравнения баланса турбулентной энергии для стационарного горизонтально-одно-родного течения получено выражение для расчета профилей коэффициента обмена:

$$K_s = K_{sl} + K_{sp}. \quad (1)$$

Коэффициент K_s в (1) представлен в виде суммы двух составляющих: сдвиговой K_{sl} , пропорциональной градиенту скорости (с двумя максимумами – у дна и в слое смешения), и “проникающей” K_{sp} , доминирующей в ядре и соответствующей третьему максимуму. Обнаруженная структура – “диффузионный триплет” – определяется спецификой турбулентного обмена в сдвиговых слоях и ядре течения. Аналитическое описание таких профилей коэффициента обмена включает отдельный расчет сдвиговой и проникающей компонент (§2).

Сдвиговая компонента описывается выражением:

$$K_{sl} = Sc^{-1} l^2 \left| \frac{dU}{dz} \right|, \quad (2)$$

где $Sc = K_u / K_s$ – число Шмидта, l – масштаб турбулентности (путь смешения), K_u – турбулентная вязкость.

Распределение проникающей составляющей по глубине представляется в виде:

$$K_{sp} = (K_{sp})_m \frac{z_p}{z} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_p^2} \left(\ln \frac{z}{z_p} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где $z_p = 0,3z_u (\pm 17\%)$ и $\sigma_p = 0,5 (\pm 15\%)$ – мода и дисперсия распределения (3); $(K_{sp})_m \cong (K_{up})_m \sqrt{Sc}$ – значение K_{sp} при $z = z_p$. Здесь $(K_{up})_m = K_{up}(z_p)$ – максимальное значение проникающей составляющей турбулентной вязкости $K_u = K_{ul} + K_{up}$; \bar{Sc} – среднее по толщине z_u число Шмидта. Соответствие профиля K_{sp} логарифмически нормальному распределению (3) проверено по критерию согласия Пирсона (с вероятностью 0,9) на основании статистического анализа нескольких десятков профилей K_s .

Профили коэффициента диффузии, рассчитанные по разработанной методике параметризации функций $K_s(z)$, согласуются с экспериментальными данными. Расчет z выполнялся по заданным осредненным характеристикам течения: средне-взвешенной гидравлической крупности ω_f , средней по толщине потока концентрации \bar{S} , значению числа Шмидта в слое смешения Sc_2 и распределению скорости течения $U(z)$. Среднее отклонение от аппроксимации, не превышающее 30%, имеет порядок погрешности определения K_s .

Четко воспроизводящееся распределение коэффициента диффузии взвеси (1) с компонентами (2) и (3), предложенное в данной работе, характеризует перенос взвеси не только под влиянием сдвиговой турбулентности, но и за счет диффузии пульсационной энергии, генерируемой на границах течения, в его ядро.

Физическая интерпретация структуры диффузионный триплет связана с двумя факторами:

1. Непосредственно со сдвиговой турбулентностью, которая генерируется в слоях смешения и придонном. Этим процессам соответствует слагаемое K_{sl} в (1).

2. С наличием центральной составляющей K_{sp} . По-видимому, эта компонента определяется преимущественно проходящими через область ядра вихрями с отличными от нуля проекциями осей на вертикаль, что обусловлено следующими причинами:

а). Непроницаемостью плоскости $z = z_m$ для крупнейших в потоке турбулентных вихрей с горизонтальными осями, ориентация которых определяется знаком $\frac{dU}{dz}$.

б). Отсутствием гасящего воздействия стратификации на орбитальные составляющие скоростей вихрей с вертикальными осями.

Анализ профилей K_s показал, что выявленная структура распределения коэффициента диффузии K_s , сохраняющаяся во времени и вдоль по потоку, типична для придонных плотностных взвесенесущих течений.

Полученное в данной работе распределение коэффициента диффузии – "диффузионный триплет" – имеет более широкую область применения, чем функции, приведенные в обзоре, которые, как правило, описываются одним максимумом $K_s(z)$ в ядре течения или у дна. Такие распределения носят частный характер, а их применение в расчетах эпюр $S(z)$ дает существенные ошибки в ядре потока и особенно слое смешения.

По известным профилям K_s и K_u получено вертикальное распределение числа Шмидта (§3), характеризующее изменения активности примеси с высотой над уровнем дна, что необходимо для описания профилей концентрации взвеси. Эти изменения особенно существенны при переходе из придонного пограничного слоя в слой смешения в сложных придонных плотностных течениях с суспензионной стратификацией. Принимая во внимание выявленные различия чисел Шмидта в сдвиговых слоях течения, удастся учесть в модели переноса взвеси изменения турбулентных потоков частиц за счет различий механизмов обмена на жидкой и твердой границах течения.

Решение уравнения диффузии с применением распределения коэффициента обмена типа "диффузионный триплет" позволяет описать реальные профили концентрации (меняющиеся в зависимости от вклада составляющих K_{sp} и K_{sl} в K_s), в том числе ступенчатые и нелинейные с разными знаками локальной кривизны (§4).

Четвертая глава – "Спектры размеров частиц взвеси в плотностных течениях" – содержит аналитическое описание спектров размеров частиц взвеси и результаты изучения связей параметров распределения частиц по размерам с осредненными характеристиками течения.

В §1 исследуются экспериментально полученные данные. На рис. 1 представлены характерные спектры размеров частиц $V_i(a_i)$, полученные одновременно с профилями скорости $U(z)$ и концентрации $S(z)$.

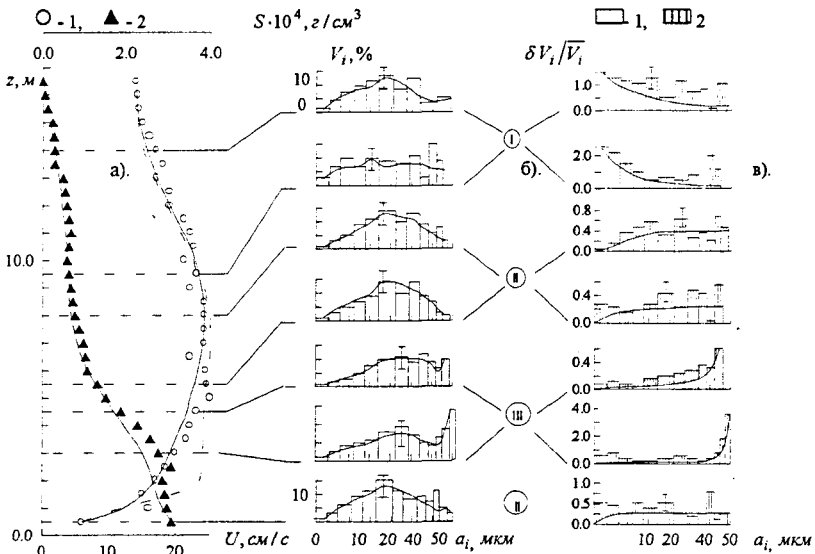


Рис.1 Распределения: а) концентрации взвеси S -1 и скорости U -2 по высоте z над уровнем дна; б) объемного содержания частиц V_i по их размерам a_i на разных уровнях z , в) отклонений $\delta V_i / \bar{V}_i$ локальных спектров $V_i(z)$ от, осредненного по толщине потока. Сплошные кривые на рис.1, а – теоретические. На рис. 1в: 1 – основные составляющие $\delta V_i / \bar{V}_i$ I, II и III рода; 2 – (заштрихованные области) дополнительные отклонения типов II при $z = 14$ м, III – 9,5 м, I и III – 5,5 м, I – 0,5 м.

Установлено, что отклонения δV_i спектров V_i от осредненного по вертикали спектра \bar{V}_i характеризуются особенностями I, II, III типов и их сочетаниями, которые связаны с изменениями механизмов массообмена по высоте z . Спад $\delta V_i / \bar{V}_i$, обычный в областях затухания турбулентного обмена (I), сменяется близким к однородному ходом $\delta V_i / \bar{V}_i$ в свдиговых слоях и ядре течения (II). Выделяются также всплески отклонений конкретных спектров от осредненного, резко выраженные для крупнозернистых фракций (III) в областях максимальных возмущений скорости течения.

Теоретическое описание спектров V_i в придонном течении проведено на основании анализа результатов измерений и решения полуэмпирического уравнения диффузии в случае течения с весомой примесью ($w \ll \omega_{fi}$) в §2, §3. Функция распределения частиц по размерам записывается в виде четырех слагаемых

$$V_i(a_i) = k_0 V_0 + k_I V_I + k_{II} V_{II} + k_{III} V_{III} \quad (4)$$

где $k_0, k_I, k_{II}, k_{III}$ – коэффициенты, зависящие от свойств течения и примеси, а $V_0, V_I, V_{II}, V_{III}$ – функции размера частиц a_i .

Первое слагаемое $k_0 V_0 = k_0 (a_i / a_1) \exp(-a_i^2 / \sigma_0)$ определяется влиянием турбулентного обмена на $V_i(a_i)$ в установившемся (стационарном, горизонтально-

однородном) течении. Здесь a_1 – средний размер частиц первой фракции, $\sigma_0(K_s)$ – дисперсия распределения V_0). Остальные составляющие в (4) связаны с механизмами массопереноса, которые приводят к особенностям I, II и III рода (рис.1, в)

1. Тонкозернистая компонента $k_I V_I = k_I V_0 (a_i/a_1)^F$, $F < 0$, которая соответствует отклонениям I рода, доминирует в (4), если процесс гравитационного оседания частиц преобладает над турбулентным взвешиванием.
2. С ростом интенсивности и масштабов турбулентного обмена повышается вероятность взвешивания частиц крупных фракций, что ведет к появлению особенностей II рода. Данный вид отклонений характеризуется слагаемым $k_{II} V_{II} = k_{II} V_0 (a_i/a_1) \exp(-a_i^2/\sigma_{II})$.
3. Последняя составляющая $k_{III} V_{III} = k_{III} (a_i/a_1)^m$, $m > 0$ относится к типу III и обусловлена преимущественно нестационарными процессами.

Теоретические распределения объемного содержания частиц взвеси согласуются измеренными в придонных взвесенесущих течениях в Нурекском водохранилище, в водохранилище Кадзурасава, в каньоне р. Конго (Юж. Атлантика), в прибрежной и центральной частях Берингова моря, в районе Гавайских островов (Тихий океан) и на полигоне НЕВБЛЕ (Сев-Зап. Атлантика).

Показано, что полученное распределение (4) позволяет проанализировать процессы обмена на перечисленных объектах по спектрам размеров частиц. Методика аппроксимации спектров размеров частиц взвеси по (4) приводится в §4.

С применением теоретического распределения частиц взвеси по размерам проведено сопоставление параметров спектров размеров с осредненными характеристиками течения (§5). Получены полуэмпирические зависимости дисперсий σ_0 и амплитудных характеристик $k_0, k_I, k_{II}, k_{III}$ спектров V_i от коэффициента обмена, концентрации взвеси, а также от возмущений полей скорости и концентрации.

В пятой главе – “Нестационарность гранулометрических спектров взвеси” – анализируются структура поля возмущений концентрации взвеси (§1) и волновые преобразования спектров размеров частиц (§2).

Применение теоретических профилей концентрации $S^0(z,t)$, полученных в квазистационарном приближении, позволило выявить структуру поля возмущений концентрации (§1). На рис.2 показаны распределения зон положительных возмущений концентрации $S_d^+ = S - S^0$ и скорости $U_d^+ = U - U^0$ во времени и по высоте над уровнем дна (методика расчета U_d^+ приведена в работах, цитируемых в диссертации).

Структура поля возмущений типична для развивающейся в потоке внутренней волны. Волновой характер выявлен

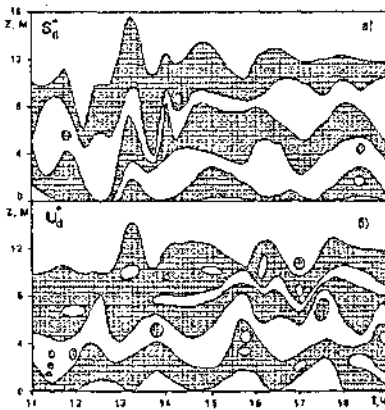


Рис.2 Эволюция внутренней волны в плотностном потоке по высоте над уровнем дна и во времени t , выведенная по распределению зон положительных возмущений концентрации S_d^+ (а) и скорости U_d^+ (б).

ных возмущений поля концентрации подтверждает правильность расчета квазистационарных профилей $S(z) = S^0$ по предлагаемой модели с учетом триплетной структуры $K_S(z)$ с переменным числом Шмидта $Sc(z)$

Для анализа природы нестационарности спектров $V_i(a_i)$ проведено сопоставление распределений во времени объемного содержания частиц конкретных размеров с профилем внутренней волны $z_w(t)$ (рис.3) (§2).

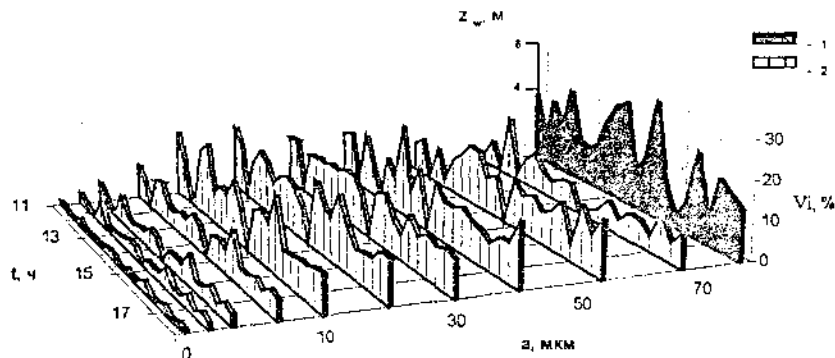
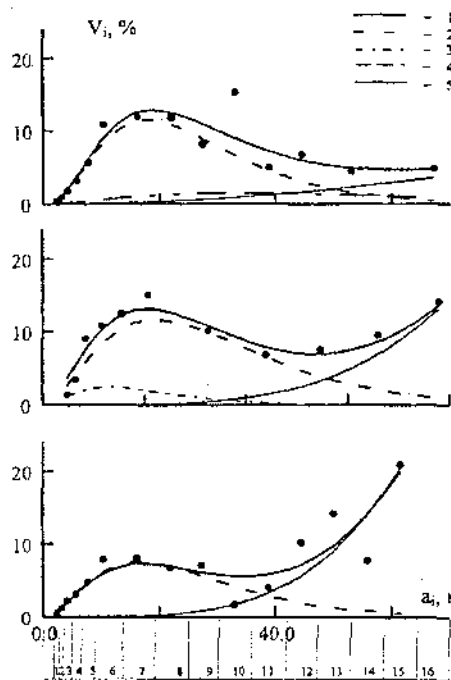


Рис. 3 Профиль внутренней волны $z_w(t)$ в плотностном потоке и распределения во времени объемного содержания $V_i(t)$ для частиц 10 фракций - 2.

Этот профиль z_w получен при анализе структуры поля возмущений скорости течения. Установлено что появление максимумов z_w сопровождается локальное увеличение V_i для частиц трех крупнейших (грубозернистых) фракций. Значения $V_i(t)$ для мелко- и грубозернистых фракций изменяются в противофазе. За время измерений на кривых $V_i(t)$ отмечено в среднем по 7 максимумов, как и на профиле $z_w(t)$. Зарегистрированные изменения гранулометрического состава взвеси связаны с повышением вертикальной компоненты скорости течения под влиянием внутренней волны. При этом обеспечиваются условия взвешивания частиц грубозернистых фракций, и на спектрах V_i резко увеличивается вклад составляющей V_{III} из (4) (рис.4).

Проведен анализ зависимости распределения частиц по размерам от вертикальной составляющей скорости внутренней волны \tilde{w} . Значения \tilde{w} были рассчитаны из уравнения теплопроводности после оценок его слагаемых. Обнаружено, что нестационарность спектров V_i обусловлена преимущественно волновым переносом крупнейших частиц. При этом условии, из уравнения диффузии частиц и по данным измерений получена возрастающая по степенному закону функция V_{III} , определяющая зависимость содержания частиц крупнейших фракций от вертикальной компоненты скорости волны (рис. 4).

Выявленная зависимость объемной концентрации частиц грубозернистой фракции от вертикальной составляющей скорости внутренней волны имеет вид:



$$V_{III} = (a_i/a_1)^m, \quad \text{где} \\ \bar{m} = (\ln[(\tilde{w} - \omega_{fr}) \cdot \omega_{fr}] - 1,2) / \ln[a_r/a_1] \quad (5)$$

Это выражение V_{III} пригодно для решения двух задач: а) для нахождения распределения частиц взвеси по их размерам по уравнению диффузии в нестационарном плотностном потоке при известных характеристиках внутренней волны, б) для оценки вертикальной компоненты скорости течения внутренней волны по спектрам размеров взвешенных частиц

Рис. 4 Спектры размеров частиц взвеси $V_i(a_i)$ в плотностном потоке в моменты времени с разными значениями вертикальной компоненты скорости внутренней волны \tilde{w} . Значение \tilde{w} увеличивается от верхнего спектра к нижнему. Здесь a_i — размер частиц, i — номер фракции. Точки соответствуют результатам измерений V_i , кривые — аппроксимациям по распределению (1) для функции $V_i - 1$ и ее составляющих $V_0, V_I, V_{II}, V_{III}$ (обозначения 2+5 соответственно).

Шестая глава — "Структурная диагностика плотностного течения по распределениям частиц взвеси" — посвящена разработке методики восстановления профиля средней скорости течения по распределению концентрации взвеси и исследованию связей параметров гранулометрических спектров с осредненными и турбулентными характеристиками потока.

Профиль $U(z)$ восстанавливается с применением найденного распределения коэффициента обмена (1) в интервале от нижнего придонного (по данным измерений) уровня z_k до верхней границы потока z_u . Распределение $U(z)$ получается из системы уравнений (§1):

$$U = \begin{cases} U(z_k) + \int_{z_k}^z \frac{Sc}{l^2} (K_s - K_{sp}) dz, & z = z_k \div z_m; \\ U_F + \Delta U_m f_u, & z = z_m \div z_u, \end{cases} \quad (6a)$$

где Sc — число Шмидта, $l(z)$ — путь смешения, K_s — коэффициент турбулентной диффузии, K_{sp} — центральная компонента K_s ; $\Delta U_m = U_m - U_F$, где $U_m = U(z_m)$ и $U_F = U(z_u)$ — скорости придонного потока (на уровне ее максимума при

($z = z_m$) и спутного течения вышележащих вод при $z \geq z_u$ соответственно),

$$\Delta z_m = z_u - z_m - \text{толщина слоя смешения, } \xi = \frac{|z - z_m|}{\Delta z_m}, \quad f_u = (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3).$$

Получение $U(z)$ из (6) по $U(z_k)$, $S(z)$, ω_f при $Sc \cong 1$ связано с определением параметров K_s , z_u , K_{sl} , Δz_m , l .

Восстановление эпюры $U(z)$ по (6а), (6б) при известных величинах $U(z_k)$, $S(z)$, ω_f и $Sc_1 \cong 1$ включает следующие этапы:

1. По $S(z)$ и ω_f находится $K_s(z)$ из уравнения диффузии весомой примеси в приближениях локальной квазистационарности и локальной горизонтальной квазигомогенности течения.

2. С применением зависимости толщины потока z_u от высоты z_s , на которой $S = \bar{S}$, находится $z_u \cong 2z_s(\pm 10\%)$. Эта зависимость выявлена по данным измерений в суспензионных течениях с $\bar{S} \leq 10^{-2} \rho_s$. Значение \bar{S} оценивается по профилю $S(z)$, как среднее в придонной области с $S > S_u$, где $S_u \cong const$ - концентрация S в слоях воды, под которыми распространяется стратифицированное течение.

3. По $K_s(z)$ определяется уровень z_p , на котором K_s достигает максимума, совпадающего с $(K_{sp})_m$. Составляющая $K_{sp}(z)$ находится из (3).

4. После определения уровней максимумов функции $K_{sl} = K_s - K_{sp}$ у дна и в слое смешения (z_{k1} и z_{k2}) получаются величины Δz_m и $l(z)$.

Толщина Δz_m равна $2(z_u - z_{k2})(\pm 15\%)$, т. к. величина K_{sl} максимальна в центре Δz_m -слоя в соответствии с (2) и (6б).

Распределение пути смешения l получается из уравнения баланса турбулентной энергии в виде: $l(z, L_a) = \frac{kz}{1 + kz/L_a}$. Здесь $k=0,4$ - постоянная Кармана,

L_a - зависящий от устойчивости стратификации масштаб обмена, аналогичный масштабу Мошнин - Обухова. Значение L_a находится по эпюре K_{sl} (2) из условия

экстремума $\left. \frac{\partial K_{sl}}{\partial z} \right|_{z=z_{k1}} = 0$ в виде: $L_a = \frac{0,4 z_{k1}^2 / z_m}{1 - 2 z_{k1} / z_m}$. Здесь

$$K_{sl} = u_\tau l(z, L_a) / Sc, \quad u_\tau \cong U_* \left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \quad \text{при} \quad \bar{S} \leq 0,5 S_k \quad \text{и} \quad Ri_a =$$

$$= \frac{g(\rho_s - \rho_w)(S_k - S_m)z_m}{\rho_s \rho_w U_m^2} = 0,5 \div 3, \quad u_\tau \text{ и } U_* - \text{сдвиговая и динамическая скоро-}$$

сти. Так определяется $l(z, L_a)$ при $z \leq z_p$.

При $z > z_p$ рост l замедляется и $\frac{\partial l}{\partial z} \ll \frac{l(z_p)}{z_p}$. Изменениями l по ординате z в ядре потока (при $z > z_p$), где $\frac{\partial U}{\partial z} \cong 0$ и $K_{sl} = K_s - K_{sp} \cong 0$ в (6а), можно пренебречь в задаче о восстановлении $U(z)$, приняв $l|_{z > z_p} \cong l(z_p)$.

5. По найденным значениям $z_m = z_u - \Delta z_m$, $l, K_s - K_{sp}$ из (6а) определяется профиль $U(z)$ при $z \leq z_m$, который сшивается с распределением (6б). Если уровень сшивания $z_1 = z_m$, то U_m получается из (6а), а величина U_F должна быть включена в число заданных параметров.

Без задания U_F эшора $U(z)$ восстанавливается с учетом симметрии профиля скорости относительно уровня z_m в ядре течения при $z = z_m \pm (z_m - z_p)$. Тогда (6а) соответствует области $z_p \div z_u$, а значения ΔU_m , U_F определяются из условий сшивания для функций $\frac{\partial U}{\partial z}$ и U из (6а) и (6б) при $z = z_p$.

Апробация предложенного метода получения профиля $U(z)$ проводилась по результатам исследования суспензионного течения в лабораторном лотке в Университете Хоккайдо и по данным натуральных исследований плотностных взвешенных потоков в водохранилищах Нурекском и Калдзурасава, а также в океаническом течении, стратификация вод которого определяется твердым стоком р. Амазонка в Атлантический океан.

Среднеквадратическое восстановление по разработанной схеме профилей $U(z)$ от измеренных – до 20%.

Предлагаемая методика получения формы профилей скорости дает возможность прогнозировать структуру суспензионного течения по известному полю концентрации при заданных значениях ω_f , Sc и $U(z_k)$.

В §2 рассматриваются и проверяются возможности применения результатов исследований распределений частиц по размерам для диагностики течения. Показано, что располагая функцией распределения коэффициента диффузии $K_s(z)$ и результатами гранулометрического анализа, можно установить связи параметров спектров $V_i(a_i)$ с турбулентными характеристиками потока. Такой подход позволил выявить и параметризовать спадающую зависимость коэффициента диффузии от объемного содержания частиц для основной спектральной моды их распределения по размерам.

Значительный интерес для диагностики течения по спектрам размеров частиц представляют приведенные в §2 выражения, определяющие связи параметров функции $V_i(a_i)$ (см. 4) и осредненных характеристик течения. В этом разделе показано, что по обнаруженным функциональным связям дисперсий и амплитудных коэффициентов спектров размеров взвеси с коэффициентом обмена и концентрацией частиц можно восстановить профили этих характеристик течения. Далее по представленной выше методике находится распределение скорости придонного плотностного потока $U(z)$. Приведены оценки, согласно которым полученные вы-

ражения, связывающие параметры спектров V_i с возмущениями полей концентрации и скорости, пригодны для анализа эволюции течения под воздействием внутренней волны.

В заключение диссертации сформулированы **Основные результаты**

1. Выявлено и представлено аналитически распределение профиля коэффициента турбулентной диффузии взвеси – диффузионный триплет, найденное с учетом процессов турбулентного обмена в сдвиговых слоях и ядре суспензионного течения.
2. Получен профиль числа Шмидта в суспензионном потоке. Установлено, что активность твердой примеси увеличивается с высотой над уровнем дна при переходе из придонного пограничного слоя в слой смешения плотностного течения.
3. Предлагаемый полумпирический метод описания профиля коэффициента турбулентной диффузии в придонном плотностном потоке позволяет рассчитывать распределения концентрации взвеси с различными знаками локальной кривизны и ступенчатые.
4. Применение теоретических распределений взвешенных частиц позволило расшифровать структуру поля возмущений концентрации взвеси. В придонном течении обнаружены колеблющиеся с амплитудой до 10м нефелондные слои с повышенной концентрацией взвеси. Динамика этого процесса определяется развитием внутренней волны в плотностном потоке.
5. Выявлена возрастающая по степенному закону зависимость содержания частиц крупнейших фракций от вертикальной компоненты скорости волны.
6. Получена и проверена функция распределения частиц по размерам, отражающая влияние гравитационного оседания, турбулентной диффузии и внутренней волны на перенос взвеси в придонном плотностном потоке.
7. Разработан и апробирован метод восстановления профиля скорости плотностного потока по эмпоре концентрации взвеси. Выявлены и проверены возможности диагностики структуры плотностного потока с внутренней волной по спектрам размеров частиц взвеси.

Результаты диссертации отражены в следующих основных работах:

1. Самолобов Б.И., Тронова Л.В. (Силаева) "Гранулометрический состав взвеси и ее диффузия в суспензионном течении с внутренней волной" Четвертая конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей" // Москва, 1994, т.1, стр.324.
2. Samolyubov B.I., Silaeva L.V. "The turbulent structure of density currents and its diagnostic on suspended particle size spectra." International session "Boundary Effects In Stratified And/Or Rotating Fluids." // St. Petersburg, June 6-8, 1995, p.140-143.
3. Самолобов Б.И., Силаева Л.В. "Диффузионный триплет в суспензионном течении." // Вестник Московского Университета, Физика и Астрономия, 1995, т.36, № 5, с.63-67.
4. Samolyubov B.I., Silaeva L.V. "Suspended particles size spectra and their connections with the turbidity current structure." International Conference "Dynamics of Ocean and Atmosphere." // Moscow, November 22-25, 1995, p.159.
5. Samolyubov B.I., Silaeva L.V. "Distribution of the suspended particles turbulent diffusion coefficient in the near - bottom density current." International Conference "Dynamics Of Ocean And Atmosphere." // Moscow, November 22-25, 1995, p.133.

6. Samolyubov B.I., Silaeva L.V., Tolkacheva O.A. "The turbulent Diffusion of suspended particles in the turbidity current." International conference "Physical Processes On The Ocean Shelf" // Svetlogorsk, June 4-7, 1996, p.70-71.
7. Самолубов Б.И., Силаева Л.В., Толкачева О. А. "Перенос взвеси стратифицированным потоком, взаимодействующим с дном." Первая Всероссийская конференция "Взаимодействие в системе литосфера – гидросфера – атмосфера." // Москва, Ноябрь 28-29, 1996, с.84.
8. Samolyubov B.I., Silaeva L.V. "Mass-exchange processes and suspended particles size spectra transformation in density current. International conference "Stability And Instability Of Stratified And/Or Rotating Fluids" // Moscow, June 24-26, 1997, p.101-108.
9. Самолубов Б. И., Силаева Л. В., Силаев А. В. "Влияние суспензионных течений на загрязнение гидросферы." Всероссийская научная конференция "Физические проблемы экологии." // Москва, июнь 23-27, 1997, т.1, стр.63, всего 112.
10. Самолубов Б.И., Силаева Л.В. "Диффузия и спектры размеров частиц взвеси суспензионном течении." // Физика Атмосферы и Океана. № 2. 1998. с.274-282
11. Самолубов Б.И., Силаева Л.В. "Восстановление профиля скорости суспензионного течения по распределению концентрации взвеси." // Вестник Московского Университета, Физика и Астрономия, № 2, 1998, с. 52-55.
12. Рыкунов Л. Н., Самолубов Б. И., Силаева Л.В. "Преобразование спектров размеров взвешенных частиц в придонном плотностном потоке." // Доклады Академии Наук. 1999. т. 362. №4. С.1-5
13. Samolyubov B.I., Silaeva L.V "Evolution of suspended particle size spectra in turbidity current with internal wave." Konstantin Fedorov memorial symposium "Oceanic Fronts and Related Phenomena." // St. Petersburg, 18-22 May, 1998, p.151-159.