

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГОРУН ВАЛЕРИЯ ВЛАДИМИРОВНА

УДК 504.4 : 54

ОПТИМИЗАЦИЯ ДАМПИНГА ГРУНТОВ  
НА УКРАИНСКОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ

11.00.11 – конструктивная география и рациональное использование  
природных ресурсов

Диссертация на соискание научной степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель:  
Юрасов Сергей Николаевич,  
кандидат технических наук, доцент

Одеса – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ПОСЛЕДСТВИЙ СБРОСА ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ДАМПИНГА.....	11
1.1. Сброс грунта в подводный отвал: особенности, характер воздействия на водную среду и распространение взвешенных веществ .....	11
1.2. Последствия воздействия дампинга грунтов на качество морской среды и биоту.....	25
1.3. Оптимизация дампинга грунтов дноуглубления .....	34
РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДВОДНЫХ ОТВАЛОВ ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ УКРАИНСКОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ ....	46
2.1. Гидрологическая характеристика .....	46
2.2. Основные черты динамики вод .....	48
2.3. Ветро-волновые условия .....	53
2.4. Рельеф и донные отложения.....	57
2.5. Гидрохимическая характеристика .....	61
2.6. Гидробиологическая характеристика .....	64
2.7. Характеристика подводных отвалов грунтов дноуглубления и степень загрязнения участков складирования.....	71
РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ Веществ в водной среде при дампинге грунтов .....	120
3.1. Постановка задачи .....	120
3.2. Модель турбулентной диффузии взвеси в плоской постановке и ее решение .....	121
3.3. Модель турбулентной диффузии взвеси в пространственной	

постановке и ее решение .....	131
3.4. Оптимизация параметров расчетных зависимостей в плоской и пространственной постановках задачи .....	138
3.5. Сопоставление результатов моделирования с расчетами по фундаментальным решениям .....	159
3.6. Сопоставление с натурными данными .....	163
<b>РАЗДЕЛ 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ДАМПИНГА ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ НА УКРАИНСКОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ .....</b>	<b>173</b>
4.1. Методические рекомендации по оптимизации дампинга грунтов дноуглубления .....	173
4.2. Методические рекомендации по расчету распространения взвеси..	174
4.3. Оптимизация дампинга грунтов дноуглубления акватории МТП «Керчь» .....	188
4.4. Расчет динамики распространения взвесей и других загрязняющих веществ при дампинге грунтов дноуглубления ГСХ «Дунай – Черное море»	198
4.5. Исследование распространения крупных фракций взвеси .....	210
4.6. Учет разной направленности поверхностного и придонного течений .....	214
4.7. Учет формы вертикального сечения облака повышенной мутности после сброса грунта .....	217
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>224</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>226</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>250</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- БПК – биохимическое потребление кислорода
- ВВ – взвешенное вещество
- ВКС – верхний квазиоднородный слой
- ГИС – географические информационные системы
- ГОИН – Государственный океанографический институт
- ГП «ОдЦ ЮгНИРО» – Государственное предприятие «Одесский центр Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии»
- ГСХ – глубоководный судовой ход
- ЗВ – загрязняющее вещество
- ИМТП – Ильичевский морской торговый порт
- КР – контрольное расстояние
- МПК – морской подходной канал
- МТП – морской торговый порт
- НП – нефтепродукты
- ОдО ИнБЮМ – Одесское отделение Института биологии южных морей
- ОМТП – Одесский морской торговый порт
- ОЧТ – основное черноморское течение
- ПДК – предельно допустимая концентрация
- СЗШЧМ – Северо-Западный шельф Черного моря
- ТМ – тяжелые металлы
- ТС – точка сброса
- УкрНЦЭМ – Украинский научный центр экологии моря
- ЧерноморНИИпроект – Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта
- ЮБК – Южный берег Крыма

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** При поддержании навигационных глубин на подходных каналах к морским и речным портам на украинской части шельфа Черного моря ежегодно изымаются сотни тысяч кубических метров грунта. Существенное снижение объемов дноуглубительных работ или их приостановка невозможны, так как дноуглубление является жизненно важной потребностью функционирования портов. В сложившейся ситуации, когда, с одной стороны – при отсутствии альтернативы необходимо складировать грунты в подводные отвалы, с другой – наносится ущерб водным экологическим системам, актуальной является задача оптимизации дампинга, состоящая в выборе на акватории наиболее подходящего места отвала грунта для рассматриваемого объекта дноуглубления.

Критерии районов дампинга впервые были отражены в Лондонской Конвенции 1972 г. и развиты в работах Государственного океанографического института. А. А. Гончаровым (1988 г.) была предложена оптимизационная численная модель для выбора места отвала грунтов дноуглубления с учетом характерных условий распространения взвеси. На сегодняшний день для поиска районов, пригодных для дампинга, используется ГИС «Дампинг». Поскольку в современных условиях существует необходимость обеспечения сбалансированности экономических и экологических аспектов развития отдельных отраслей морехозяйственной деятельности, первоочередной задачей является экономико-экологическая оптимизация дампинга грунтов дноуглубления.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ Одесского государственного экологического университета (ОГЭКУ): «Социально-экологическая характеристика и защита от паводков в

Придунайском регионе» (№ ДР 0111 U 000224, 2010-2011), «Состояние и качество природной среды прибрежной зоны Северо-Западного Причерноморья» (№ ДР 0112 U 007931, 2012).

Тема работы соответствует национальной политике в области регулирования дноуглубления и дампинга, которая закреплена рядом программных документов, среди которых основными являются: Водный кодекс Украины от 6 июня 1995 года № 213/95-ВР, Закон Украины «Об охране окружающей природной среды» от 25 июня 1991 года № 1264-ХІІ, Налоговый кодекс Украины от 2 декабря 2010 года № 2755-VI, Закон Украины «Об аквакультуре» от 18 сентября 2012 года № 5293-VI, Закон Украины «Об исключительной (морской) экономической зоне Украины» от 16 мая 1995 года № 162/95-ВР, Постановление Кабинета Министров Украины «Об утверждении Правил охраны внутренних морских вод и территориального моря от загрязнения и засорения» от 29 февраля 1996 года № 269.

**Цель и задачи исследования.** *Цель работы* состоит в научном обосновании и разработке методики выбора на акватории украинской части шельфа Черного моря наиболее подходящих с экологической и экономической точек зрения мест отвала грунтов дноуглубления.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие *задачи*:

- провести аналитический обзор современных теоретико-методологических подходов к анализу последствий сброса грунтов дноуглубления и оптимизации дампинга;
- выполнить обобщение, систематизацию и анализ информации о дампинге грунтов существующих объектов дноуглубления на украинской части шельфа Черного моря;
- разработать методику оптимизации дампинга грунтов дноуглубления с целевой функцией, включающей экономическую и экологическую составляющие;
- разработать рекомендации по поиску оптимального варианта расположения отвала грунтов в зависимости от различных условий на

акватории с использованием трехмерной модели турбулентной диффузии взвеси в водной среде;

– разработать инженерную методику расчета распространения взвеси в водной среде после сброса грунта и расчетный модуль «Дампинг-взвесь»;

– определить особенности практического применения предложенных методик и выполнить численные эксперименты по исследованию распространения взвеси и оптимизации дампинга на конкретных объектах украинской части шельфа Черного моря.

*Объект исследования* – дампинг грунтов дноуглубления.

*Предмет исследования* – оптимизация дампинга грунтов дноуглубления в прибрежном районе моря.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы: методы математической статистики – при анализе информации по дампингу грунтов, гидрометеорежиму, биоресурсам и численному моделированию; методы математического анализа – при выводе дифференциальных уравнений; методы численного моделирования – при решении дифференциальных уравнений и при постановке численных экспериментов.

**Научная новизна полученных результатов** состоит в разработке и обосновании подходов к выбору на акватории украинской части шельфа Черного моря мест отвала грунтов дноуглубления с учетом эколого-экономических последствий.

*В исследовании впервые:*

– предложен вид целевой функции поиска оптимального варианта расположения места отвала грунтов дноуглубления, который позволяет наилучшим образом сбалансировать экономические интересы с экологической безопасностью;

– сформулированы необходимые и достаточные условия, при которых дампинг грунтов в рассматриваемой точке будет оптимальным, и определены пути поиска наиболее подходящего места отвала в различных условиях;

– выполнены обобщение и систематизация информации по дампингу

грунтов объектов дноуглубления украинской части шельфа Черного моря (объемы дночерпания и дампинга, гранулометрический и химический состав грунтов);

– методом сеток получено решение краевой задачи турбулентной диффузии взвеси в пространственной постановке задачи с использованием цилиндрической системы координат, которое положено в основу расчетного модуля «Дампинг-взвесь»;

– получен безразмерный параметр, который учитывает осаждение частиц взвеси в водной среде и их удаление из нее, а также вместе с коэффициентами Куранта позволяет задать условия устойчивости решения.

*Усовершенствовано:*

– действующие специализированные методики расчета распространения взвеси при дампинге грунтов, основанные на решении двумерных дифференциальных уравнений турбулентной диффузии.

*Получило дальнейшее развитие:*

– методические подходы к поиску оптимального расположения отвалов грунтов на украинской части шельфа Черного моря;

– численное моделирование распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в водной среде: исследованы явная, неявная и смешанная схемы метода сеток при решении поставленной задачи.

**Практическое значение полученных результатов.** Разработанная методика оптимизации дампинга грунтов дноуглубления и методика расчета распространения взвеси могут быть использованы при технико-экономических обоснованиях выбора районов расположения подводных отвалов грунта. Данные методики успешно использованы в проектно-изыскательских работах, выполненных ЧерноморНИИпроектом: «Технические предложения по выбору местоположения подводного отвала и проект подводного отвала грунтов дноуглубления объектов ГП «Керченский МТП»» и «Комплексный мониторинг окружающей среды при восстановлении и эксплуатации глубоководного судового хода (ГСХ) Дунай – Черное море в 2013 году». Кроме того,

результаты работы используются частной научной фирмой «Институт комплексных проблем морского природопользования и НТП» и на кафедре морских и речных портов, водных путей и их технической эксплуатации Одесского национального морского университета.

Использование материалов и результатов диссертационного исследования подтверждается соответствующими актами внедрения.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке воздействия дампинга грунтов на качество водной среды и биоту, при проведении работ по захоронению отходов в море, эксплуатации морских подходных каналов, охране рыбных запасов, мониторинге гидротехнических и дноуглубительных работ.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является самостоятельно выполненной научной работой, в которой представлена разработанная автором методика выбора на акватории украинской части шельфа Черного моря наиболее подходящих с экологической и экономической точек зрения мест отвала грунтов дноуглубления. Все научные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично. Из научных работ, опубликованных в соавторстве, в работе использованы только те идеи и положения, которые являются результатом личной работы соискателя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных конференциях регионального, общегосударственного и международного уровня: X-XII научные конференции молодых ученых ОГЭКУ (Одеса, 2010-2012); IV-VI Международные научные конференции «Региональные экологические проблемы» (Одесса, 2011-2012); III-IV Всеукраинские научно-практические конференции «Вода: проблемы и пути решения» (Житомир, 2010, Ровно, 2013); VII научно-практическая конференция «Наука. Молодежь. Экология» (Житомир, 2011); IV Региональная научная конференция «Экология, неэкология, охрана окружающей среды и сбалансированное природопользование» (Харьков, 2011); III Международная

научно-техническая конференция «Управление, автоматизация и окружающая среда» (Севастополь, 2012); VII-VIII Международные научные конференции «Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона» (Керчь, 2012-2013); Международная молодежная конференция «Измерения, моделирование и информационные системы для изучения окружающей среды» (Воронеж, Россия, 2012); Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы Черного моря» (Одесса, 2012); VI Международная научная конференция «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, Россия, 2012); I Всеукраинская (с международным участием) научная конференция «Экология, неэкология, охрана окружающей среды и сбалансированное природопользование» (Харьков, 2012); XIII Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2013 года: экологические проблемы XXI-го века» (Минск, Беларусь, 2013); V Международная научная конференция «Фундаментальная и прикладная геологическая наука глазами молодых ученых: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения» (Баку, Азербайджан, 2013); Всеукраинская научно-практическая конференция «Экологические проблемы природопользования и охрана окружающей среды» (Ровно, 2013); VI Всеукраинская научная конференция с международным участием «Проблемы гидрологии, гидрохимии, гирозологии» (Днепропетровск, 2014).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликованы 24 научные работы, из них – 6 статей в научных профессиональных изданиях, которые входят в соответствующий перечень, утвержденный МОН Украины, 2 – в иностранных научных изданиях.

# РАЗДЕЛ 1

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ПОСЛЕДСТВИЙ СБРОСА ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ДАМПИНГА

### 1.1. Сброс грунта в подводный отвал: особенности, характер воздействия на водную среду и распространение взвешенных веществ

Процесс дноуглубления включает в себя следующие технологические операции: извлечение (разработку), перевозку и размещение донного грунта.

При размещении извлеченных донных масс в море грунт перевозится грунтоотвозными шаландами или самоотвозными землесосами на место отвала и сбрасывается на дно.

Альтернативными методами, полностью исключая воздействие материалов дночерпания на морскую среду, являются различные виды использования грунтов для хозяйственных целей: намыв береговых зон с целью создания техногенных территорий, в первую очередь для селитебных и военных нужд [1]. В ЧерноморНИИпроект были проведены исследования по использованию донных отложений в качестве строительного материала для кирпичей, керамзита и плитки. Известны также исследования биологической рекультивации грунтов дноуглубления [2, 3].

Широкому внедрению новых методов мешают трудности технического и организационного характера, поэтому основная масса извлекаемых грунтов подлежит сбросу в подводный отвал, т.е. дампингу.

Процесс сброса грунта дноуглубления в подводный отвал достаточно исследован и описан во многих научных работах [4–14]. В этом процессе

выделяют четыре основных фазы.

В первой фазе грунт опускается через толщу воды в виде компактного облака или водогрунтовой струи повышенной плотности. Облако формируется в случае, если опорожнение трюма происходит до момента контакта грунта с дном. Наблюдения показали, что при глубинах 10-70 м влияние глубины места на характер сброса состоит лишь в увеличении размывания струи (облака) на ее границе [7]. Поскольку предельная скорость опускания струи достигается достаточно быстро, на энергию удара струи о дно глубина не влияет. Значение этой скорости по разным оценкам составляют от 1,5 м/с до 1,8 м/с [7, 11, 13]. Течения со скоростью до 0,7 м/с не влияют на характер прохождения водогрунтовой струи через толщу воды [7]. Значительное влияние течение (как фактор перемешивания и горизонтальной диффузии) оказывает на часть мелкодисперсной составляющей сброса, которая остается в толще воды долгий период времени.

Вторая фаза – столкновение опускающейся струи с дном. Часть сбрасываемого материала остается в месте контакта на дне, где образуется конус сброса, а часть формирует кумулятивный горизонтальный сброс в виде мутьевого потока, который расширяется вдоль уклонов дна. Вследствие значительной избыточной объемной плотности и большой скорости конвективного осаждения (порядка нескольких метров в секунду) влияние факторов морской среды пренебрежимо мало, а действие этой фазы исключительно локально.

Выпавшие несвязные грунты и комки связного грунта образуют на дне устойчивые образования. Форма и размеры таких образований зависят от скорости (около 20 см/с) и энергии мутьевого потока, а также от скорости диссипации этой энергии. Форма отложения грунта на дне также существенно зависит от соотношения комковатой и разжиженной составляющих материала сброса. Если комки грунта, образующиеся в процессе землечерпания, не разрушаются до момента удара о дно, то они образуют коническую насыпь, окруженную неагрегированным материалом, выпавшем из мутьевого потока.

В третьей фазе происходит медленное растекание и осаждение грунта в придонном слое. При этом водогрунтовая смесь ведет себя как более плотная жидкость, практически не смешиваясь с окружающей водой [10, 13]. В результате этого толщина придонного слоя мутности чрезвычайно быстро уменьшается [7, 10, 14]. Натурные исследования и расчеты показывают, что обычно распространение сброшенного грунта на дне ограничивается зоной первоначального разброса. Однако, если дно в месте отвала имеет заметный уклон, то мутьевой поток может распространяться на значительные расстояния в результате пополнения кинетической энергии за счет потери потенциальной при опускании по склону. В отдельных случаях при уклонах дна, больших критического значения 0,05, могут формироваться мутьевые потоки [7]. Характерный временной масштаб этой фазы составляет 20-30 минут.

Четвертая фаза – фаза пассивной дисперсии перешедшей во взвесь и оставшейся в толще воды части сброшенного грунта. В этой фазе перенос и пространственное распределение частиц грунта определяется не динамикой сброса, а турбулентными условиями, течениями и плотностной стратификацией водной толщи в месте сброса [10]. На мелководной свалке при условии начального динамического смещения от поверхности до дна облако относительно равномерно распределяется во всей толще воды. При больших глубинах места сброса и наличии плотностной стратификации значительная часть взвеси сосредоточена в приповерхностном пятне в пределах верхнего перемешанного слоя [4].

Согласно анализу данных об особенностях процесса прохождения грунта через толщу воды оценка влияния дампинга на водную среду должна учитывать как кратковременное, так и долговременное воздействие [15–17].

Долговременное воздействие носит, как правило, локальный характер, ограничиваясь пределами подводного отвала, и может продолжаться десятки лет. Оно выражается в миграции ЗВ из материала сброса в воду. Кратковременное воздействие дампинга грунтов обусловлено попаданием в воду ВВ и ЗВ, аккумулированных в этих грунтах. В отличие от

долговременного воздействия оно имеет большие пространственные и меньшие временные масштабы. По результатам наблюдений установлено, что облако повышенной мутности, образовавшееся после сброса грунтов, может существовать несколько часов и переноситься на расстояние в несколько километров.

Более точная количественная оценка пространственно-временных масштабов кратковременного воздействия по результатам наблюдений не представляется возможной. Это обусловлено в первую очередь тем, что по прошествии некоторого времени после сброса трудно увидеть превышение мутности над фоном в несколько мг/дм<sup>3</sup> (в особенности при достаточно высокой фоновой мутности) и в связи с этим визуально оценить распределение облака повышенной мутности. Рыбохозяйственный норматив превышения мутности составляет всего 0,25 или 0,75 мг/дм<sup>3</sup>, поэтому оценить размеры, расстояние переноса и время существования облака повышенной мутности возможно только методами математического моделирования [18].

Для оценки распространения ВВ при сбросе в морскую среду грунтов дноуглубления могут быть использованы различные решения, полученные с помощью аналитических, численных и статистических методов [13, 19–23].

Примером статистических моделей может быть метод, предложенный Е.В. Борисовым для оценки распределения консервативной примеси в море [24]. Двумерная плоская модель описывает распределение лагранжевых частиц в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) в зависимости от распределения спектральной плотности проекций скорости течения на координатные оси. Расчет ведется на основании обработки рядов наблюдений за дрейфом буев в различных синоптических ситуациях. После получения репрезентативного объема информации для каждой выделенной синоптической ситуации ряды наблюдений сглаживаются с выбранным временным масштабом. На основании сглаженных и исходных рядов графически получают распределение плотности вероятности для координат лагранжевой частицы. Концентрация ЗВ  $S(x, y, t)$  рассчитывается как произведение плотности вероятности координат

лагранжевой частицы  $F_n[\vec{r}|l \leq \lambda(t)]$  на начальную концентрацию в пятне  $S_0$  (отношение количества ЗВ к начальному объему пятна)

$$S(x, y, t) = S_0 F_n[\vec{r}|l \leq \lambda(t)]. \quad (1.1)$$

Следует отметить, что статистические методы довольно громоздки. Кроме того, учитывая пространственно-временную изменчивость гидродинамических характеристик в природных водоемах, модели такого рода могут описывать диффузию примеси лишь в районах, ограниченных проводимыми наблюдениями, при условии набора достаточного объема информации об изменчивости течений в различных синоптических ситуациях, необходимого для расчета функций  $F_n(\vec{r})$ . Поэтому применение этих методов расчета для практических количественных оценок представляется проблематичным вследствие сложности получения исходных данных для репрезентативного описания процесса диффузии и жесткой привязки к району наблюдений.

Для практических целей используют аналитические методы. Время, затрачиваемое на получение исходной информации и расчеты, в этом случае, как правило, невелико, что дает возможность применять такие методы в оперативной практике. Примером такого подхода для оценки распределения концентрации ВВ при дноуглубительных работах, но без учета осаждения, является модель, предложенная Е.Д. Молдовановой [25]. Шлейф мутности описывается двумерным стационарным уравнением турбулентной диффузии с постоянными коэффициентами (составляющие скорости течения и горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии). Функция источника задается распределением Дирака. Полученное аналитическое решение задачи с использованием функции Макдональда описывает распределение концентрации ВВ в шлейфе мутности самоотвозного землесоса.

Применительно к дампингу грунтов дноуглубления оптимизационная

задача рассматривалась С.Л. Беленко и А.Н. Наумовым [26]. На основании аналитического решения (1.3) двумерного уравнения диффузии и осаждения ВВ (1.2) искалась последовательность точек сбросов, обеспечивающая минимизацию концентрации ВВ в воде в районе отвала.

$$\frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial y} + \sigma_i \bar{\varphi}_i - K_L \Delta \bar{\varphi}_i = \bar{F}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.2)$$

где  $\bar{\varphi}_i = \frac{1}{H} \int_0^H \varphi_i(x, y, t) dz$  – усредненная по глубине концентрация частиц грунта

$i$ -го класса микроагрегатного состава, г/м<sup>3</sup>;

$H$  – средняя глубина в районе сброса, м;

$u, v$  – проекции скорости течения на декартовы координаты, м/с;

$K_L$  – горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$\sigma_i = \frac{W_i}{H}$  – величина, учитывающая оседания частиц грунта  $i$ -го класса

микроагрегатного состава на дно с эффективной скоростью  $W_i$ ;

$\bar{F}_i$  – функция источника;

$n$  – общее число классов микроагрегатного состава грунта.

$$\bar{\varphi}_i(x, y, t) = \frac{q_i}{4\pi K_L H(t-t_0)} \exp \left\{ -\sigma_i(t-t_0) - \frac{[x-x_0 - u_i(t-t_0)]^2 + [y-y_0 - v_i(t-t_0)]^2}{4K_L(t-t_0)} \right\}, \quad (1.3)$$

где  $q_i = \alpha_i Q_i$  – количество частиц грунта  $i$ -го класса микроагрегатного состава, перешедшее во взвешенное состояние, г;

$\alpha_i$  – эмпирический коэффициент перехода частиц  $i$ -го класса во взвешенное состояние;

$Q_i$  – общее количество микроагрегатов  $i$ -го класса в сбрасываемом грунте, г;

$(x_0, y_0)$  – координаты ТС.

Вопросами прогнозирования распространения ВВ, возникающего при добыче железомарганцевых конкреций, занималась С.В. Кирильчик [27]. Предложенная ею математическая модель распространения ВВ, имеющего сложный гранулометрический состав, учитывает микротурбулентную диффузию ВВ, обусловленную турбулентным движением водной среды и конвекцию ВВ, вызванную циркуляционным движением водных масс в океане; гравитационное осаждение ВВ; взаимные переходы между различными фракциями, составляющими ВВ; взаимодействие частиц с дном и со свободной поверхностью.

Одной из аналитических методик расчета является применение радиально-симметричных моделей диффузии. В качестве примера такого подхода для оценки распространения ВВ при дампинге грунта могут быть рассмотрены методики А.А. Гончарова [28] и А.А. Прозорова [17].

Общая расчетная формула А.А. Гончарова имеет вид [28]

$$\bar{C}(r, t^*) = \frac{q}{2\pi(pt^*)^2} \exp\left(-\frac{r}{pt^*} - \frac{Wt}{D}\right), \quad (1.4)$$

где  $\bar{C}(r, t^*)$  – средняя концентрация ВВ, г/м<sup>3</sup>, равномерно распределенного в пределах слоя толщиной  $D$ , м;

$q$  – масса сброшенного ВВ, г, приходящаяся на единицу глубины в пределах слоя толщиной  $D$ , м;

$p$  – «скорость» диффузии ВВ, м/с;

$t^*$  – фиктивное время, учитывающее эффект динамического расширения начального пятна взвеси при точечной аппроксимации источника, с;

$r$  – расстояние от центра пятна, м;

$t$  – реальное время, отсчитываемое от момента сброса, с;

$W$  – эффективная скорость оседания ВВ, м/с.

Реальное время  $t$ , отсчитываемое от момента сброса, связано с модельным временем  $t^*$  соотношением

$$t = t^* - t_0, \quad (1.5)$$

где  $t_0$  – поправка к реальному времени, обусловленная влиянием динамического эффекта в процессе начального разбавления (с), рассчитываемая по формуле

$$t_0 = r_0 / p\sqrt{3}, \quad (1.6)$$

где  $r_0$  – эквивалентный радиус начального пятна взвеси, м.

У А.А. Прозорова выражение, описывающее распределение содержания ВВ в диффундирующем пятне с учетом ее оседания, имеет вид [17]

$$C(r, t) = \frac{Q}{4\pi HDt} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt} - \frac{W}{H}t\right), \quad (1.7)$$

где  $C(r, t)$  – осредненное по глубине в пределах рассматриваемого слоя значение концентрации ВВ, г/м<sup>3</sup>;

$r$  – расстояние от центра пятна взвеси, м;

$D$  – горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$H$  – глубина рассматриваемого слоя, м;

$W$  – эффективная скорость оседания ВВ, м/с;

$Q$  – количество ВВ, оставшегося в рассматриваемом слое воды после сброса грунта, г.

Количество грунта  $Q$ , переходящего во взвешенное состояние при сбросе в подводный отвал, определяется по формуле [17]

$$Q = K \cdot p \cdot V \frac{\gamma - \gamma_B}{\gamma_T - \gamma_B} \gamma_T, \quad (1.8)$$

где  $K$  – коэффициент перехода грунта во взвешенное состояние при сбросе в отвал, в долях единицы, определяющийся по формуле

$$K = 6,214 \frac{\sqrt{H-h}}{c} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{l} \right), \quad (1.9)$$

где  $c$  – удельное сцепление сбрасываемого в отвал грунта с учетом его разрыхления в процессе выработки и погрузки в трюм шаланды, Па;

$H$  – глубина в районе отвала или толщина ВКС, м;

$h$  – осадка судна в грузу, м;

$l$  – длина днищевой двери, м;

$b$  – средняя за время разгрузки ширина раскрытия днищевой двери, м;

$p$  – содержание в грунте пылеватых и глинистых частиц, мельче 0,1 мм,

в долях единицы;

$V$  – объем сброса, м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – объемный вес грунта в трюме шаланды с учетом его разрыхления, т/м<sup>3</sup>;

$\gamma_B$  – объемный вес воды, т/м<sup>3</sup>;

$\gamma_T$  – удельный вес частиц грунта, т/м<sup>3</sup>.

Зависимость (1.9) дает возможность оценивать количество грунта, переходящего во взвешенное состояние при дампинге, с учетом основных влияющих факторов: свойств сбрасываемого грунта, стратификации и глубины в районе отвала, а также технологических параметров сброса.

Предложенные А.А. Гончаровым и А.А. Прозоровым идеализированные расчетные методики схематичны и используются для оценки осредненных интегральных характеристик пятна взвеси по глубине в некотором объеме.

Для описания распространения ВВ в «дальней зоне», используется трехмерное уравнение переноса и диффузии. Однако Ю.С. Юрезанская и В.Н. Котеров [29] считают, что даже при существенном влиянии вертикального турбулентного обмена трехмерная задача переноса и диффузии полидисперсного ВВ, порождаемого мгновенным точечным источником, может быть сведена к интегрированию двумерного (осредненного по глубине) уравнения для монодисперсного ВВ с зависящей от времени скоростью

осаждения. Авторы предлагают для расчета распространения ВВ в «дальней зоне» использование усредненной по глубине транспортно-диффузионной модели. Для ее реализации ими предложен и опробован бессеточный гибридный стохастический метод дискретных облаков [30].

В методике [30] распределение ВВ представляется совокупностью «эллиптических» дискретных облаков со следующим гауссовым распределением усредненной по глубине концентрации ВВ

$$C = \frac{m(t)}{2\pi H(x_0(t))\sigma'_{1C}(t)\sigma'_{2C}(t)} \exp\left(-\frac{x_1'^2}{2\sigma_{1C}'^2(t)} - \frac{x_2'^2}{2\sigma_{2C}'^2(t)}\right), \quad (1.10)$$

где  $m$  – текущая масса ВВ в облаке;

$x_0$  – координаты центра облака в глобальной системе координат.

Штрихами помечены локальные координаты, отсчитываемые от центра облака ( $x_1'$  – в направлении движения воды,  $x_2'$  – в перпендикулярном направлении). Каждое облако характеризуется моментом своего возникновения  $t_0$  и начальными дисперсиями  $\sigma_{1C0}'^2$  и  $\sigma_{2C0}'^2$ . Центры  $x_0$  облаков на каждом временном шаге  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  перемещаются вместе с водой и испытывают распределенные по нормальному закону случайные блуждания, характеризующиеся общей дисперсией  $\sigma_X^2(t)$  (дисперсия случайных приращений координат на каждом шаге процесса равна  $\sigma_X^2(t_{n+1}) - \sigma_X^2(t_n)$  соответственно).

А.В. Маслаковым [31] была сделана попытка применить концепцию «ближней зоны», пространственный масштаб которой коррелирует с размером объекта, загрязняющего акваторию, и «дальней зоны», включающей контрольные створы, для проведения расчетов переноса примеси от берегового источника (сточные воды станции биологической очистки).

Рассмотренные аналитические методики сводят задачу расчета распространения ВВ к плоской постановке (рассматривается среднее значение

концентрации ВВ по глубине) с использованием экспоненциального распределения в пространстве и во времени. Это не позволяет учитывать турбулентный обмен ВВ в водной толще по вертикали и смоделировать вторичные пики содержания мелкодисперсного ВВ в верхних слоях после сброса.

Для описания диффузии примеси в реальных водоемах наиболее широко применяется полуэмпирическая теория турбулентности. Наиболее распространены численные методы моделирования рассеяния ЗВ в водоемах.

Численные модели для прогнозирования краткосрочного распространения грунта дноуглубления были разработаны следующими авторами: Koh и Chang [32], Brandsma и Divoky [33], Johnson [34].

Данные относительно «судьбы» сброшенных грунтов дноуглубления по прошествии значительного отрезка времени после сброса весьма малочисленны. Для оценки характера этих процессов и возможного их моделирования используют исследования перемещения естественных донных осадков [35–39]. В работе [40] разработаны две двумерные модели, которые реализуют эту задачу в численном виде.

В [14, 23] представлены модели для расчета распределения концентраций ВВ в облаке взвеси, генерируемым непрерывным сбросом драгируемого грунта с помощью выносного трубопровода. Так, например, в [23] разработана математическая модель, позволяющая получать основные характеристики образующегося при сбросе «факела» ВВ. Для расчета требуются данные о мощности источника ВВ ( $q$ ), глубине ( $D$ ), и средней скорости течения ( $u$ ) в месте сброса, среднем диаметре или скорости осаждения ВВ, средней скорости диффузии ( $\omega$ ). Модель [23] основана на решении адвективно-диффузионного уравнения для непрерывно распределенного по глубине постоянного источника. Решение этого уравнения относительно осредненной по глубине концентрации имеет вид

$$C(x, y, t) = \frac{q}{\pi\omega^2 D t} \int_0^t \frac{1}{t^{*2}} \exp \left[ - \left( \frac{u}{\omega} \right)^2 \left( \frac{x^* - t^*}{t^*} \right)^2 - \gamma t^* \right] dt^*. \quad (1.11)$$

В выражении (1.11)  $C = \frac{1}{D} \int_0^D \sum C_i dz$ , безразмерные координаты  $x^*$ ,  $y^*$  и

время  $t^*$  определяются выражением  $x = x^*ut$ ,  $y = y^*ut$ ,  $\gamma = Wt/D$ , где  $W$  – эффективная скорость осаждения, м/с.

Среди отечественных специалистов исследованием распространения ВВ занимались Г.Я. Шкудова [41, 42], С.В. Афанасьев [43], Л.Я. Трукшане [44].

Г.Я. Шкудова предложила две модели переноса ЗВ в мелком баротропном (1.12) и глубоком бароклинном (1.13) море [41, 42]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{S}{\tau_0}, \quad (1.12)$$

где  $S$  – концентрация динамически пассивной диффундирующей примеси, г/м<sup>3</sup>;

$u, v$  – горизонтальные составляющие скорости по осям координат, м/с;

$K_x$  и  $K_y$  – коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальных направлениях, м<sup>2</sup>/с;

$\tau_0$  – «время жизни» субстанции, с;

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + (w + w_n) \frac{\partial S}{\partial z} = K_{x,y} \Delta S + K_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - \frac{S}{\tau_0} + Q \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z'), \quad (1.13)$$

где  $u, v, w$  – составляющие скорости течения по осям координат, м/с;

$\Delta$  – плоский оператор Лапласа;

$w_n$  – собственная гравитационная вертикальная скорость, м/с;

$K_{x,y}$  и  $K_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно, м<sup>2</sup>/с;

$\delta$  – дельта-функция Дирака.

В качестве гидродинамического блока использована модель А.С. Саркисяна. Численные эксперименты выполнялись применительно к

распространению консервативного ЗВ в Черном море без учета его осаждения или деструкции.

Численная модель турбулентной диффузии ВВ С.В. Афанасьева [43] описывает не только осаждение ВВ, но и взмучивание донных осадков. Численные реализации были выполнены применительно к условиям сброса ВВ в акваторию при намыве грунта гидромеханизированным способом.

Л.Я. Трукшане [44] рассматривает переформирование прибрежного отвала грунтов дноуглубления за счет волнового воздействия и дисперсию ЗВ, содержащихся в грунтах отвала. Ее модель основана на численном решении уравнения баланса наносов. Распределение ЗВ моделируется на основании расчета волнения и волновых течений в прибрежной зоне.

Непосредственно моделированием распространения ВВ на СЗШЧМ занимались С.А. Лонин [45] и Д.В. Алексеев [46].

С.А. Лонин [45] разработал математическую модель двухфазной жидкости вода-взвесь для мелководной северо-западной части Черного моря с учетом ветрового взмучивания донных отложений и обратного влияния ВВ на турбулентный режим и течения.

С целью исследования процессов эрозии, транспорта и седиментации мелкодисперсного ВВ Д.В. Алексеев [46] трехмерную гидродинамическую модель (Фомин В.В., 2002) дополнил блоком расчета концентрации ВВ. Концентрация  $C$  ВВ находится путем решения уравнения переноса-диффузии, которое учитывает процесс гравитационного осаждения

$$\frac{dC}{dt} - \frac{\partial(w_c C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1.14)$$

где  $C$  – концентрация примеси, г/м<sup>3</sup>;

$A_H$  и  $K_H$  – коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно,  $A_H=10$  м<sup>2</sup>/с,  $K_H=10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;

$w_s = 10^{-5}$  м/с – скорость осаждения ВВ.

Исследованием влияния дампинга в устьевой области Дуная украинского сектора Черного моря занимались И.А. Бровченко и В.С. Мадерич [47], Gils J. [48], Р.И. Демченко, М.И. Железняк и др. [49, 50], С.Л. Кивва и М.И. Железняк [51]. В данных специализированных моделях распространения ВВ после сброса грунтов задача рассматривается в плоской постановке. Более универсальные трехмерные модели [47], сопряженные с моделями гидродинамики, позволяют исследовать более широкий спектр задач, связанных с размывом, переносом и осаждением многофракционных наносов. Однако они слишком сложны для производства оперативных расчетов на практике при инженерных изысканиях.

В [52] уравнение распространения ВВ в  $\sigma$ -координатной системе имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial C_i U D}{\partial x} + \frac{\partial C_i V D}{\partial y} + \frac{\partial C_i (\omega + \omega_c)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_c}{D} \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D A_c \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D A_c \frac{\partial C_i}{\partial y} \right] + Q(x, y, \sigma), \end{aligned} \quad (1.15)$$

где  $x, y, \sigma, t$  – координатная система;

$C_i$  – концентрация фракции ВВ, г/м<sup>3</sup>;

$U, V$  – горизонтальные компоненты скорости течения, м/с;

$\omega$  – вертикальная составляющая скорости, м/с;

$\omega_{ci}$  – гравитационная вертикальная скорость фракции ВВ, м/с;

$$D = H + \eta, \quad (1.16)$$

где  $H$  – глубина, м;

$\eta$  – уровень, м;

$K_c$  и  $A_c$  – коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно, м<sup>2</sup>/с;

$Q$  – источник загрязнения, г/(м<sup>3</sup>\*с).

В [52] рассматривается модель установившейся турбулентной диффузии

ВВ. Однако использование предложенного дифференциального уравнения в прямоугольных координатах в пространственной постановке задачи в случае неустановившейся турбулентной диффузии слишком затруднено в связи с необходимостью выполнения очень большого количества расчетов.

Численные методики на основании дифференциального уравнения (1.15) позволяют проводить вычисления по достаточно полным адвективно-диффузионным уравнениям, моделировать весьма произвольный гидродинамический режим и сложные зависимости коэффициентов от внешних условий, а также учитывать различные типы функций источника и граничных условий. Их научная ценность несомненна. Однако эти модели сталкиваются с проблемой задания пространственного распределения поля течения. Обычно для этого в модель включается гидродинамический блок, на основании которого численно моделируется циркуляция. Но это приводит к еще большей неопределенности задания начальных, граничных условий и параметров модели. Их применение для получения количественных оценок реальных процессов ограничено.

## 1.2. Последствия воздействия дампинга грунтов на качество морской среды и биоту

Основной действующий фактор при дноуглублении и дампинге грунта – повышенная концентрация ВВ. В процессе работ во взвешенное состояние, в зависимости от номенклатуры грунтов, переходит от 1 до 5 % от общего количества разработанных (сброшенных) грунтов [4, 7, 8, 13, 14]. Степень воздействия повышенного содержания ВВ в воде зависит от интенсивности и продолжительности его действия, времени, необходимого для восстановления

первоначального состояния, а также гидролого-гидрофизических и гидрохимических характеристик среды.

Формирование донных отложений на акваториях и подходных каналах портов происходит на фоне значительного антропогенного загрязнения [53]. Так, согласно исследованиям, проведенным ОдО ИнБЮМ, УкрНЦЭМ, ГП «ОдЦ ЮгНИРО», ЧерноморНИИпроект и др., установлено, что около трети грунтов, изымаемых при дноуглубительных работах, загрязнено. Приоритетными ЗВ являются нефтепродукты (НП), фенолы, токсичные тяжелые металлы (ТМ), ДДТ, полихлорбифенилы.

В областях активных динамических явлений может произойти дисперсия осадка, и ВВ вместе с ЗВ могут распространяться на значительные расстояния как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Мелкодисперсные фракции грунтов в прибрежной зоне могут отлагаться на расстоянии 10-15 км от места сброса [1], на больших глубинах (около 100 м) это расстояние увеличивается в несколько раз [54]. В результате распространения ЗВ грунты свалок пагубно влияют на экосистемы не только района свалок, но и всей прилегающей акватории моря. Кроме того, донные отложения, содержащие ЗВ, могут разделяться на взвешенные частицы и осадочную фазу. В результате фильтрующей деятельности бентоса ЗВ на взвешенных частицах могут попадать в пищевую цепь или могут быть рециркулированы в осадок через биоосаждение [55].

Основным способом предупреждения ухудшения качества водной среды при дампинге является исследование состава и свойств изымаемых грунтов. При этом определяют физические свойства грунта, химический состав, санитарно-гигиенические показатели [56].

Класс грунтов дноуглубления по степени их загрязненности определяется по содержанию регламентирующих ингредиентов согласно «Классификации грунтов дноуглубления Азово-Черноморского бассейна по степени их загрязненности в пределах Украины», приведенной в таблице 1.1.

**Классификация грунтов дноуглубления Азово-Черноморского бассейна по степени их загрязненности в пределах Украины [57]**

Ингредиенты, мг/кг	Классы				
	A	I	II	III	IV
Кадмий	$\leq 1,0$	1,0-2,0	2,0-3,0	3,0-5,0	$> 5,0$
Ртуть	$\leq 0,1$	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,5	$> 0,5$
Свинец	$\leq 10$	10-20	20-100	100-200	$> 200$
Цинк	$\leq 60$	60-80	80-150	150-400	$> 400$
Медь	$\leq 30$	30-50	50-100	100-250	$> 250$
Мышьяк	$\leq 5,0$	5,0-6,0	6,0-8,0	8,0-10,0	$> 10$
Общий фосфор	$\leq 670$	670-800	800-1000	1000-1200	$> 1200$
Общий фтор	$\leq 200$	300-400	400-500	500-600	$> 600$
НП	$\leq 100$	100-200	200-300	300-1000	$> 1000$
Фенолы	$\leq 1,0$	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-3,0	$> 3,0$

Класс А – природно-чистый грунт (эталон).

Класс I – условно чистый грунт; подлежит сбросу в море, не являясь опасным для морской среды, с компенсацией ущерба.

Класс II – умеренно загрязненный и загрязненный грунт; дампинг возможен после компенсации ущерба морской среде и рыбному хозяйству; желательна утилизация, рациональное использование грунтов дноуглубления (береговые отвалы, строительные материалы).

Класс III – сильно загрязненный грунт; сброс в море возможен только по спецтехнологии; подача на берег нежелательна; желательна утилизация; определяется ущерб водной среде и размер компенсаций.

Класс IV – токсичный грунт; сброс в море категорически запрещен; в исключительных случаях возможно только захоронение по спецтехнологии; подача на берег возможна лишь после предварительного обезвреживания и обогащения грунтов.

Механическое воздействие, вызывающее гибель представителей бентоса и изменение субстрата их обитания на дне, относительно невелико в силу

локальности зоны. При выполнении серии сбросов на специально отводимых и согласуемых с природоохранными органами участках подводных отвалов воздействию подвергается в той или иной степени вся площадь отвала.

Наименьшее воздействие при сбросе незагрязненного грунта наблюдается, если сбрасываемый материал по своему составу близок к составу донных грунтов на отвале. Самую большую опасность для бентоса представляют жидкие илы, растекающиеся на значительной площади [11].

Исследования Ф.А. Гейдарова и С.Ю. Кузнецова [58] на математической модели показали, что воздействие сбрасываемого грунта на гидрохимическое состояние морских вод кратковременно.

По результатам натурных исследований [59] были сделаны следующие основные выводы в отношении долгопериодного химического воздействия:

- повышенное содержание фосфатов (в том числе и в вегетационный период, когда они практически отсутствуют в воде) в придонном слое всего полигона. Максимальные значения концентрации наблюдались в центральной части отвала и составляли 30-53 мкг/дм<sup>3</sup>;

- повышенное содержание НП. На придонном горизонте максимальная концентрация нефтяных углеводородов в районе отвала в отдельные периоды была в 2 раза выше среднего максимального его содержания за пределами участка сбросов;

- в отношении ТМ эффекты долговременного воздействия на водную среду зафиксированы только по меди и свинцу. Так, например, содержание в воде свинца в придонном горизонте в центре отвала в 4-5 раз превышали фоновые значения, кроме того, в пределах всего полигона его придонные концентрации почти в два раза превышали содержание в поверхностном слое.

Рост концентраций ЗВ в воде после сброса приводит к уменьшению содержания растворенного кислорода и в некоторой степени значений рН, увеличению показателей биохимического потребления кислорода (БПК), развитию дефицита кислорода, вплоть до его истощения [60].

Упомянутые изменения условий среды отражаются на состоянии

планктонных и донных биоценозов, испытывающих обычно отрицательное влияние [1, 61, 62].

Воздействие сбросов на нейстонных гидробионтов незначительное и наблюдается в момент сброса как механическое действие. В случае образования поверхностной пленки при сбросе материалов, загрязненных нефтью, НП, поверхностно-активными и другими веществами, снижается газообмен на границе воздух-вода. Это приводит к гибели личинок беспозвоночных животных, икры, личинок и мальков рыб, а также вызывает увеличение численности нефтеокисляющих микроорганизмов [63].

Влияние дампинга на планктон связано в основном с поступлением в воду большого количества ВВ, биогенных и органических веществ.

Влияние на фитопланктон характеризуется снижением общего числа видов (в 2-5 раз). В районах дноуглубления, а также на мелководных отвалах (при резком и длительном снижении прозрачности воды) численность и биомасса существенно снижаются – в 2-7 раз (в отличие от глубоководных участков дампинга грунта, где часто наблюдается «эффект удобрения») [62, 63]. При длительном проведении дноуглубительных работ может нарушаться сезонная динамика биомассы. Численность фитопланктона может оставаться высокой за счет преобладания новых доминирующих видов.

В целом в районе дноуглубления, а также на мелководных отвалах грунта происходит снижение функциональной активности фитопланктона, а в глубоководных районах отвала грунта – стимуляция сообщества поступлением в воду биогенных веществ со сбрасываемым грунтом.

В зоне повышенной мутности, независимо от характера работ, всегда происходит сокращение числа видов зоопланктона всех таксономических групп (до 45-60 % от исходного). Основные потери приходятся на долю седиментаторов и фильтраторов, максимально – на беспанцирных коловраток (роды *Synchaeta*, *Polyarthra*, *Conochilus*) и несколько меньше – мелких кладоцер (из родов *Bosmina*, *Chydorus*, *Daphnia*). Наиболее устойчивы к воздействию повышенной мутности воды копеподы. Соответственно, в сообществе

сокращается доля «мирных» форм и возрастает доля «хищников». В составе планктона кратковременно появляются придонные формы. Одновременно увеличивается средний размер особи сообщества [64].

Происходит нарушение сезонного хода динамики численности и биомассы сообщества. В районе дноуглубления численность и биомасса зоопланктона снижаются, по сравнению с исходными, в кратности от двух до нескольких десятков, а в некоторых случаях – и сотен раз. В наибольшей степени это проявляется в осенний период на фоне естественного сезонного снижения количественных показателей сообщества.

Воздействие сбросов на бентосные организмы выражено сильнее, поскольку они длительное время находятся в тесном контакте со сброшенными грунтами [62, 65–70].

Согласно работ, проводившихся на свалках грунта в Черном море, при регулярных и часто повторяющихся сбросах незагрязненного грунта иного гранулометрического состава, чем донные отложения окружающих акваторий, происходит быстрая перестройка донного биоценоза в соответствии с характером нового биотопа и могут появляться доминирующие виды [71]. Так, доминирование 1-2 видов организмов наблюдалась на свалках грунта в Черном море [66]. На свалке грунта Одесского порта в биоценозе преобладал моллюск *Mya arenaria*, биомасса которого достигала  $640 \text{ г/м}^2$  (на три порядка больше, чем за пределами отвала). На Ильичевской свалке начинали доминировать мидии. Их биомасса за пределами отвала колебалась от  $0,3$  до  $13 \text{ г/м}^2$ , а на отвале достигала  $2500 \text{ г/м}^2$ .

Влияние сбросов грунта на донные биоценозы может быть и более значительным, приводящим к полному исчезновению видов из состава биоценоза. Так, в Черном море количество видов на отвале грунта Одесского порта уменьшилось с 49 до 23, в Ильичевском районе – с 48 до 28 и в Григорьевском – с 34 до 21 [66].

Действие сбросов на донные биоценозы затрагивает не только состав сообщества в результате изменения физических характеристик исходного

субстрата, но может обуславливать и токсические эффекты.

Наименее опасен сброс чистых грунтов, совпадающих по своему характеру с теми, на которые они ссыпаются. В этом случае происходит только засыпание животных, живущих в данном районе. При этом гибнут как все прикрепленные, так и мелкие малоподвижные формы [11]. При сбросе грунтов, отличающихся по своим физическим характеристикам от того, на который их ссыпают, восстановление донной фауны осложняется. На новом субстрате уже не могут поселиться местные формы, и реколонизация осуществляется благодаря оседанию пелагических личинок других видов животных, принесенных течениями из прилегающих районов, где имеется сходный тип грунта, и в какой-то степени вследствие миграции взрослых особей. Это приводит к изменению видового состава донного сообщества.

Изменение видовой структуры и смена доминирующих форм донных биоценозов влекут за собой сокращение величин численности и биомассы.

Пагубное влияние на донные сообщества оказывает высокое содержание ВВ, возникающее при дампинге. Особенно чувствительны к ней мелкие организмы; даже при концентрации  $44 \text{ мг/дм}^3$  на 10 % сокращается скорость роста молодежи двустворчатых моллюсков. Лабораторные эксперименты показывают, что при концентрации ВВ около  $100 \text{ мг/дм}^3$  сокращается степень выживаемости личинок сельди [55].

Дампинг грунта наносит большой ущерб ихтиофауне, включая промысловую, оказывая на нее как прямое пагубное воздействие, так и косвенное [55, 61, 72]. Прямое воздействие имеет кратковременный характер и выражается в повреждении жабр рыб взвешенными частицами грунта, обеднении состава и снижении численности ихтиопланктона, ухудшении качества водной среды в зоне повышенной мутности. Последнее заключается в уничтожении запасов кормовой базы, разрушении нерестилищ и сокращении нагульных площадей. Большие объемы сброса и количества образующегося при этом ВВ оказывают влияние далеко за пределами отведенной для этих целей площади дна.

Таким образом, донные сообщества испытывают длительное хроническое воздействие, которое приводит к деградации биоценоза, выражающейся в обеднении видового состава, а также часто в снижении численности и биомассы организмов, изменении возрастной структуры популяций. Последствия сброса грунта на планктонные организмы носят кратковременный характер и связаны с зоной короткопериодного воздействия.

Одним из показателей эколого-экономической оценки воздействия дампинга грунтов дноуглубления является общий экономический ущерб окружающей природной среде. Количественно он определяется величиной компенсационных платежей за ущерб, наносимый водной среде и биологическим ресурсам [73, 74].

Согласно ст.249 Налогового кодекса Украины [73] сумма налога, который изымается за сброс ЗВ в водные объекты ( $P_c$ ), рассчитывается по формуле

$$P_c = \sum_{i=1}^n (M_{Li} \times H_{Pi} \times K_{oc}), \quad (1.17)$$

где  $M_{Li}$  – объем сброса  $i$ -того ЗВ, т;

$H_{Pi}$  – ставка налога в текущем году за тонну  $i$ -того ЗВ, грн.;

$K_{oc}$  – коэффициент, который используется в случае сброса ЗВ в пруды и озера, равный 1,5 (в противном случае 1).

Ущерб водным биоресурсам рассчитывается в соответствии с методикой [74]. Он включает ущербы, возникающие от ухудшения условий нагула и нереста.

Расчет ущерба в натуральном выражении от ухудшения условий нагула (от гибели кормовых организмов)  $N$  выполняется по формуле

$$N = n \times P / B \times 1 / K_2 \times K_3 / 100 \times F \times T \times 10^{-6}, \quad (1.18)$$

где  $N$  – ущерб от гибели кормовых организмов, т;

$F$  – площадь, объем поражения,  $m^2$ ,  $m^3$ ;

$P/B$  – коэффициент для перевода биомассы кормовых организмов в продукцию кормовых организмов;

$n$  – средняя концентрация кормовых организмов,  $г/м^2$ ,  $г/м^3$ ;

$K_2$  – кормовой коэффициент для перевода продукции кормовых организмов в рыбопродукцию;

$K_3$  – показатель предельно возможного использования кормовой базы рыбой, %;

$T$  – коэффициент кратности воздействия, отражающий время отрицательного воздействия;

$10^{-6}$  – множитель для перевода граммов в тонны.

Расчет ущерба от локального ухудшения условий нереста, нагула или зимовки рыб ведется по методу площадей, через приведение подвергающихся изменению площадей к площади полной потери рыбопродуктивности, по формуле

$$N = \sum P_i \times S \times F_1/F_0 \times q \times d \times 10^{-3}, \quad (1.19)$$

где  $N$  – ущерб, т;

$P_i$  – рыбопродуктивность водоема по данному виду или по экологически близким видам,  $кг/га$ ;

$S$  – площадь водоема, утрачивающего рыбохозяйственное значение,  $га$ ;

$F_0$  – исходная зона (общая площадь нерестилищ, нагульная площадь, акватория зимовки в данном водоеме),  $га$ ;

$F_1$  – часть зоны, подвергающаяся отрицательному воздействию,  $га$ ;

$q$  – поправочный коэффициент на разнокачественность нерестовых, нагульных или зимовальных площадей, определяющийся как отношение качественных показателей данного рыбохозяйственного участка к таким же показателям, средним для всех таких площадей в водоеме;

$d$  – коэффициент интенсивности неблагоприятного воздействия;

$10^{-3}$  – множитель для перевода килограммов в тонны.

Ущерб в стоимостном выражении, согласно [74], определяется посредством расчета капитальных вложений на осуществление мероприятий, компенсирующих ущерб рыбным запасам

$$K = \sum_{i=1}^n (M_i \times K_i) \times E_n \times t_i, \quad (1.20)$$

где  $i$  – тип мероприятия или объекта;

$M_i$  – мощность его по промысловому возврату, т;

$K_i$  – удельные капитальные вложения в объекты данного типа, тыс. грн./т;

$E_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,12;

$t_i$  – время отрицательного воздействия на рыбные запасы, год.

Удельные капитальные вложения на воспроизводство 1 т рыбы-сырца на 2013 г. составляют 211,38 тыс. грн.

### 1.3. Оптимизация дампинга грунтов дноуглубления

Решая вопрос оптимизации дампинга грунтов дноуглубления какого-либо объекта, обычно на акватории, находящейся на некотором удалении от данного объекта, рассматривают варианты расположения районов, пригодных для дампинга. Критерии районов дампинга впервые были отражены в Лондонской Конвенции 1972 г. и развиты в дальнейшем работами ГОИНа [7, 75, 76]. К сожалению, развитие количественных критериев выбора районов дампинга в значительной мере затруднено в первую очередь недостаточной изученностью

разнообразных физических, химических, биологических и других процессов в морских экосистемах.

А.А. Гончаровым [28, 77, 78] была предложена оптимизационная численная модель для выбора места отвала грунтов дноуглубления с учетом характерных условий распространения ВВ. Модель построена на трехмерном уравнении турбулентной диффузии ВВ и позволяет на основании сопряженной задачи путем перебора функционала (функции предполагаемого источника) получить координаты источника, обеспечивающего минимальное воздействие (концентрацию ВВ) в рассматриваемой области. Результаты расчетов, полученные с помощью предложенной модели, не позволяют выделить район дампинга, отвечающий ряду требований, соблюдение которых делает отвал эффективным с экономической и с экологической точек зрения [79]:

- район дампинга должен находиться в относительной близости от объектов дноуглубительных работ;

- отвал грунта не должен размываться под действием волнения и течения;

- подходы к отвалу не должны ограничивать движение грунтоотвозных судов и не создавать препятствий судоходству;

- отвал грунта должен иметь грунтовместимость, достаточную для многолетней эксплуатации, или носить локальный характер для одноразового использования при строительстве конкретного объекта;

- отвал грунта должен располагаться в местах с наименьшей биологической продуктивностью, а также при наличии информации: не препятствовать миграции рыб и других гидробионтов, не ухудшать условия нереста и т.д.

В связи с этим при выборе районов пригодных для дампинга учитывают следующее:

- гидрологическую структуру вод;

- динамику вод;

- режим ветра и ветрового волнения;

- рельеф дна и характеристику донных отложений;

- гидрохимические показатели воды, геохимические характеристики донных отложений и грунтов дноуглубления;
- навигационную и гидрографическую обстановку;
- гидробиологическую характеристику донного биоценоза.

На сегодняшний день для поиска районов, пригодных для дампинга, используется ГИС «Дампинг» (Приложение А) [79, 80], которая позволяет оценить суммарный балл для каждого района по комплексу перечисленных ранее показателей (кроме навигационной обстановки). Процедура определения пригодных для дампинга районов такова: по каждому показателю строится карта (слой) и наносится сетка; в каждую ячейку сетки в зависимости от значения показателя записывается балл (по показателям балл может изменяться от 0 до 50); после совмещения слоев (суммирования баллов) выделяются участки с наибольшими значениями интегрального балла; далее наносятся запретительные для дампинга слои, на которых содержится информация о навигационной обстановке (фарватеры, якорные стоянки, разворотные круги и т.д.); в качестве пригодных выбираются районы с наибольшими значениями интегрального балла не попавшие в запретные участки.

Обобщенная информация, полученная с использованием ГИС «Дампинг», не позволяет выбрать район (если их несколько с примерно одинаковым значением интегрального балла) и точку в районе, где были бы оптимально сбалансированы экологическая и экономическая составляющие дампинга грунтов. Кроме того, в этом ГИС-пакете не учитываются условия, предъявляемые к качеству морской среды после сброса: ограничение содержания фаз грунтов в соответствии с нормативным документом [81] и ограничение содержания ЗВ в облаке повышенной мутности на контрольном расстоянии (КР) от точки сброса (ТС) в соответствии с рыбохозяйственными нормами [82, 83].

Первое условие проверяется при получении разрешения на дампинг грунтов на основании лабораторных исследований [81]. Второе – на основании результатов математического моделирования.

Информацию ГИС «Дампинг» по районам и два последних ограничения следует рассматривать как условия необходимые для осуществления дампинга. При их соблюдении поиск оптимального решения следует выполнять по целевой функции, включающей экологическую и экономическую составляющие.

В отдельных случаях одна из составляющих (или обе) может быть исключена, вместе с этим будет изменяться и функция поиска оптимума. Поэтому выбор оптимального района или оптимальной точки расположения отвала в районе можно осуществить с использованием следующих показателей:

- а) по приведенным затратам, включающим затраты по флоту при доставке грунта к отвалу и ущерб водным биоресурсам после сброса грунта;
- б) по ущербу водным биоресурсам после сброса грунта;
- в) по кратности разбавления ЗВ в облаке повышенной мутности на КР от ТС грунта;
- г) по расстоянию от дноуглубительных работ до места дампинга.

Таким образом, концептуально оптимизацию дампинга можно сформулировать следующим образом [84].

Дампинг грунтов в рассматриваемой точке будет оптимальным, если выполняются необходимые (все) и достаточные (одно из четырех) условия его осуществления.

Необходимые условия (определяющие возможность дампинга):

- через 4 часа после сброса концентрация фаз грунта ни в зоне первоначального смешения, ни за ее пределами не должна превышать  $0,01LC_{50}$  (где  $LC_{50}$  – средняя летальная концентрация фазы) [81];

- в облаке повышенной мутности на КР от ТС (250 м, если оно не указано в исходных данных) концентрации ЗВ, попавших в воду, не должны превышать рыбохозяйственные нормативы [82, 83];

- район расположения перспективной точки отвала, выбранный с помощью ГИС «Дампинг», должен характеризоваться максимальным значением суммарного балла [79, 80].

Достаточные условия (оптимизирующие):

- минимум суммарных приведенных затрат, включающих затраты по флоту и ущерб экологической системе от сброса грунтов, в общем случае;
- минимум экологического ущерба от сброса грунтов, если расстояние до отвалов по вариантам отличается незначительно;
- максимум кратности разбавления попавших в воду веществ в облаке повышенной мутности на КР от ТС, если расстояние до отвалов и значения гидробиологических показателей в точках их расположения по вариантам отличаются незначительно;
- минимум расстояния до отвалов, если значения гидробиологических показателей в точках расположения отвалов по вариантам отличаются незначительно.

Рассмотрим общий случай оптимизации [84].

а) При решении оптимизационных задач, связанных с какой-либо хозяйственной деятельностью, в качестве целевой функции часто используют приведенные затраты. В таком случае при поиске оптимального решения в целевую функцию по вариантам включают: капиталовложения в объекты хозяйственной деятельности, приведенные к расчетному году; текущие эксплуатационные расходы по упомянутым объектам; различные виды ущербов и потерь, связанные с рассматриваемой хозяйственной деятельностью. При этом постоянные составляющие по вариантам исключают.

Проанализируем приведенные затраты по поддержанию навигационных глубин на каналах. Для этого весь процесс дноуглубительных работ разделим на две части: 1 – изъятие грунта из канала; 2 – транспортировка изъятых грунтов к месту расположения отвала и его сброс.

Для существующих каналов при выполнении ремонтного черпания первая часть работ имеет однозначную пространственную привязку. Здесь можно рассматривать варианты технологии дноуглубления и сроки проведения этих работ с целью нанесения наименьшего ущерба водным биоресурсам, учитывая при этом условия техники безопасности. Технология выполнения дноуглубительных работ является отдельным весьма сложным вопросом,

который не является предметом настоящего исследования, поэтому в рамках решаемой задачи ее будем считать заданной. Таким образом, расходы по дноуглубительным работам (вместе с ними и ущерб водным биоресурсам при выполнении дноуглубительных работ) в нашей целевой функции будут постоянной величиной, которую можно не рассматривать.

Вторая часть работ связана с расходами по флоту при доставке грунта к отвалу (экономическая составляющая) и с ущербом водным биоресурсам после сброса грунта (экологическая составляющая). Целевая функция и принцип выбора оптимального варианта при работе многочерпакового земснаряда будут иметь вид

$$E = T_D Ш_K (\delta K_{Ш} / 365 + Э_{Ш}) + У_{БР} = \min, \quad (1.21)$$

где  $T_D$  – продолжительность дноуглубительных работ, сут.;

$Ш_K$  – предполагаемое количество шаланд для перевозки грунта в караване;

$K_{Ш}$  – балансовая стоимость шаланд, тыс. грн;

$\delta$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капиталовложений на морском транспорте, принимается равным 0,12 [85];

$Э_{Ш}$  – суточные эксплуатационные расходы по шаландам, тыс. грн./сут.;

$У_{БР}$  – ущерб биоресурсам, тыс. грн.

Потребное количество шаланд  $Ш_{П1}$  в земкараване для работы земснаряда без простоев рассчитывается в соответствии с РД 31.74.08-85 [86] по формулам:

$$Ш_{П1} = t_{Ц} / [t_{ПОДХ} + t_{ОТХ} + t_3]; \quad (1.22)$$

$$Ш_{П2} = t_{Ц} / t_3, \quad (1.23)$$

где  $Ш_{П1}$ ,  $Ш_{П2}$  – потребное количество шаланд в земкараване при работе земснаряда на один или на два борта соответственно;

$t_{Ц}$  – продолжительность цикла шаланды, ч;

$t_{ПОДХ}$ ,  $t_{ОТХ}$  – продолжительность подхода шаланды к земснаряду и отхода от него, ч [87];

$t_3 = K_{ТР} W_{ТР} / (q_{ЗС} K_P)$  – продолжительность загрузки шаланды;

$K_{ТР}$  – коэффициент использования вместимости грунтового трюма [87];

$W_{ТР}$  – вместимость грунтового трюма, м<sup>3</sup> [87];

$q_{ЗС}$  – нормативная часовая производительность земснаряда, м<sup>3</sup>/ч [87];

$K_P$  – коэффициент разрыхления грунта [87].

Продолжительность цикла шаланды равна

$$t_{Ц} = t_3 + S/v_1 + S/v_2 + t_P + t_{ПОДХ} + t_{ОТХ}, \quad (1.24)$$

где  $S$  – расстояние до отвала, км;

$v_1$ ,  $v_2$  – скорость шаланды в грузу и порожнем, км/ч [87];

$t_P$  – продолжительность разгрузки шаланды, ч [87].

Продолжительность дноуглубительных работ  $T_D$  рассчитывается по формуле

$$T_D = W_D / [(24 - T_{ОСТ}) q_{ЗС} K_{ТР} K_{Ш}], \quad (1.25)$$

где  $W_D$  – объем черпания по объекту, м<sup>3</sup>;

$T_{ОСТ}$  – суммарное нормативное время остановок работы земснаряда за сутки, ч;

$K_{Ш} = Ш_K / Ш_{Пi}$  – коэффициент недостатка шаланд.

В суммарное суточное нормативное время остановок работы земснаряда включается: установка, снятие и завозка якорей; снабжение топливом и водой; пропуск судов; гидрометеорологические причины и прочее.

При выполнении дноуглубительных работ самоотвозными землесосами целевая функция будет иметь вид

$$E = T_D (\delta K_3 / 365 + \mathcal{E}_3) + Y_{БР} = \min, \quad (1.26)$$

где  $K_3$  – балансовая стоимость землесоса, тыс.грн.;

$\mathcal{E}_3$  – суточные эксплуатационные расходы по землесосу, тыс.грн./сут.

Продолжительность дноуглубительных работ рассчитывается по формуле

$$T_d = W_d / (24q), \quad (1.27)$$

где  $q$  – производительность самоотвозного землесоса, м<sup>3</sup>/ч.

В общем случае  $q$  рассчитывается по формулам [86]:

при работе с переливом –

$$q = [W_{TP} + Q_{CM} P_C t_{ПЕР} K_Y] / t_{Ц}, \quad (1.28)$$

при работе без перелива –

$$q = [Q_{CM} P_{II} t_{ГР} K_Y + W_{ГР} (1 - K_Y)] / t_{Ц}, \quad (1.29)$$

где  $W_{TP}$  – вместимость трюма землесоса, м<sup>3</sup>;

$Q_{CM}$  – подача грунтовых насосов по смеси, м<sup>3</sup>/ч;

$P_C$  – консистенция смеси, сливаемой за борт;

$t_{ПЕР}$  – продолжительность перелива, ч;

$K_Y$  – коэффициент уноса грунта течением;

$t_{Ц}$  – продолжительность цикла землесоса, ч;

$P_{II}$  – консистенция смеси, подаваемой в трюм;

$t_{ГР}$  – продолжительность грунтозабора, ч;

$W_{ГР}$  – объем грунта в трюме в состоянии естественного залегания, м<sup>3</sup>.

Продолжительность цикла землесоса рассчитывается по формуле [86]

$$t_{Ц} = t_{ГР} + t_{РАЗ} + t_X + t_{УСТ} + t_{РАЗГ}, \quad (1.30)$$

где  $t_{РАЗ}$  – продолжительность разворотов при смене галсов, ч;

$t_X$  – продолжительность хода землесоса на отвал и обратно, ч;

$t_{УСТ}$  – продолжительность съёмки и установки землесоса, ч;

$t_{РАЗГ}$  – продолжительность разгрузки трюма, ч.

Уменьшим количество составляющих в (1.26), подставив в его первое слагаемое выражения (1.27), (1.28) или (1.29) и (1.30)

$$T_D (\delta K_3/365 + \mathcal{E}_3) = a[t_{ГР} + t_{РАЗ} + t_X + t_{УСТ} + t_{РАЗГ}], \quad (1.31)$$

где  $a = W_D (\delta K_3/365 + \mathcal{E}_3)/\epsilon$ ;

$$\epsilon = 24[W_{ГР} + Q_{СМ} P_C t_{ПЕР} K_Y] \text{ – при работе с переливом}; \quad (1.32)$$

$$\epsilon = 24[Q_{СМ} P_{П} t_{ГР} K_Y + W_{ГР} (1 - K_Y)] \text{ – при работе без перелива}. \quad (1.33)$$

В формуле (1.31) величины  $t_{ГР}$ ,  $t_{РАЗ}$ ,  $t_{УСТ}$  и  $t_{РАЗГ}$  не зависят от расстояния до перспективных точек отвала, эти слагаемые можно не учитывать в целевой функции, тогда (1.26) можно записать в виде

$$E = W_D t_X (\delta K_3/365 + \mathcal{E}_3)/\epsilon + Y_{БР} = \min. \quad (1.34)$$

Если проделать аналогичную операцию с формулой (1.21), то ее тоже можно представить в виде (1.34). В этом случае:

$$t_X = S/v_1 + S/v_2 \text{ – время хода шаланды на отвал и обратно}; \quad (1.35)$$

$$\epsilon = (24 - T_{ОСТ}) q_{ЗС} (t_{ПОДХ} + t_{ОТХ} + t_3) K_{ГР} K_{Ш} \text{ – при работе на один борт}; \quad (1.36)$$

$$\epsilon = [(24 - T_{ОСТ}) W_{ГР} K_{ГР}^2]/K_P \text{ – при работе на два бота}. \quad (1.37)$$

Для укрупненных расчетов формулу (1.34) можно записать в виде:

для земснарядов –

$$E = W_D t_X (\delta K_{Ш}/365 + \mathcal{E}_{Ш}) K_P / [24 W_{ГР} K_{ГР}^2] + Y_{БР} = \min, \quad (1.38)$$

для землесосов –

$$E = W_D t_X (\delta K_3 / 365 + \Theta_3) / [24 W_{TP}] + Y_{BP} = \min. \quad (1.39)$$

В формулах (1.21), (1.26), (1.34), (1.38) и (1.39) первое слагаемое зависит от расстояния до перспективной точки отвала. Чем больше это расстояние, тем больше приведенные затраты по флоту. Второе слагаемое находится в прямой зависимости от значения гидробиологических показателей района расположения отвала.

б) Если расстояние до перспективных точек по вариантам отличается незначительно, то в формулах (1.21), (1.26), (1.34), (1.38) и (1.39) первое слагаемое можно не рассматривать, и поиск оптимального решения представляется возможным выполнить, учитывая только ущерб водным биоресурсам. Оптимальной будет точка с минимальным ущербом.

в) Если значения гидробиологических показателей в рассматриваемых точках расположения отвалов и расстояние до них по вариантам отличаются незначительно, то формулы (1.21), (1.26), (1.34), (1.38) и (1.39) использовать нельзя. В этом случае в качестве функции поиска оптимума можно использовать показатель кратности разбавления ЗВ в облаке повышенной мутности на КР от ТС грунта. Оптимальной будет точка с максимальной кратностью разбавления.

г) Если значения гидробиологических показателей в рассматриваемых точках расположения отвалов по вариантам примерно равны, то второе слагаемое в формулах (1.21), (1.26), (1.34), (1.38) и (1.39) можно не рассматривать. В этом случае минимум приведенных затрат по флоту будет наблюдаться в точке, ближайшей к месту дноуглубительных работ.

Для всех вариантов поиска оптимального решения необходима надежная информация о характеристиках облака повышенной мутности на КР от ТС грунта. Расстояние от ТС грунта до места оценки качества вод по рыбохозяйственным нормам [88] для пресноводных водоемов составляет не

более 500 м, для прибрежных вод морей – 250 м (за исключением отдельных случаев).

### ***Выводы к разделу 1***

1. В процессе сброса грунта дноуглубления в подводный отвал выделяют четыре основных фазы, которые в зависимости от способа и объема сброса, а также глубины на отвале протекают по-разному: опускание грунта через толщу воды в виде компактного облака или водогрунтовой струи повышенной плотности; столкновение опускающейся струи с дном (часть материала остается в месте контакта на дне, где образуется конус сброса, другая часть формирует кумулятивный горизонтальный сброс в виде мутьевого потока, который расширяется вдоль уклонов дна); медленное растекание и осаждение грунта в придонном слое; перенос и пространственное распределение частиц грунта под действием турбулентности и течений в месте сброса.

2. Дампинг грунтов дноуглубления оказывает кратковременное и долговременное воздействие на водную среду: а) долговременное воздействие носит локальный характер, ограничиваясь пределами подводного отвала, выражается в миграции ЗВ из материала сброса в воду и может продолжаться десятки лет; б) кратковременное воздействие дампинга грунтов обусловлено попаданием в воду взвеси и ЗВ, аккумулированных в этих грунтах; в отличие от долговременного воздействия оно имеет большие пространственные и меньшие временные масштабы.

3. Сброс в море грунтов дноуглубления сопровождается комплексом негативных последствий: увеличением концентрации загрязняющих и взвешенных веществ в воде после сброса (в процессе работ во взвешенное состояние переходит от 1 до 5 % от общего количества сброшенных грунтов); деградацией донных сообществ, угнетением и гибелью фито- и зоопланктона, ухудшением условий фотосинтеза; возможным вторичным загрязнением водных масс вредными веществами, содержащимися в извлеченном грунте.

4. Оптимизацию дампинга грунтов дноуглубления следует выполнять с

использованием целевой функции, которая включает экономическую составляющую – приведенные затраты по флоту, связанные с доставкой грунта к отвалу, и экологическую составляющую – ущерб водным биоресурсам, возникающий в результате гибели живых организмов из-за сброса грунта. Оптимальным является вариант с минимумом приведенных затрат.

5. В зависимости от сложившихся условий выбор оптимального решения можно осуществить по минимуму экологического ущерба, если расстояние до отвалов по вариантам отличается незначительно; по максимуму кратности разбавления ЗВ в облаке повышенной мутности на КР от ТС грунта, если расстояние до отвалов и значения гидробиологических показателей в точках их расположения по вариантам отличаются незначительно, и по минимальному расстоянию до места отвала, если значения гидробиологических показателей в точках расположения отвалов по вариантам отличаются незначительно.

6. Для всех вариантов поиска оптимального решения необходима надежная информация о характеристиках облака повышенной мутности на КР от ТС грунта. В существующих в настоящее время специализированных моделях распространения ВВ после сброса грунтов задача рассматривается в плоской постановке. Более универсальные трехмерные модели, сопряженные с моделями гидродинамики, позволяют исследовать более широкий спектр задач, связанных с размывом, переносом и осаждением многофракционных наносов. Однако они слишком сложны для проведения на практике оперативных расчетов при инженерных изысканиях.

## РАЗДЕЛ 2

### ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДВОДНЫХ ОТВАЛОВ ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ УКРАИНСКОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ

#### 2.1. Гидрологическая характеристика

Гидрологический режим шельфовой зоны Черного моря в целом соответствует морским акваториям умеренного климатического пояса. Однако региональные особенности (ветровой режим, адвекция вод, мелководность шельфовой зоны, наличие речного стока) формируют своеобразный и отличный от остальной части моря характер со многими специфическими особенностями.

В шельфовой зоне распресненные воды, соприкасаясь с черноморскими, образуют пограничную переходную область или так называемый гидрологический фронт, протягивающийся вдоль всего побережья Черного моря. Районы фронтальных разделов, характеризующиеся дивергентным характером течений, являются зонами накопления ЗВ. Взаимодействие различных водных масс в зоне гидрологического фронта и их интенсивное перемешивание, безусловно, является одной из главных особенностей гидрологии шельфовой зоны описываемого района.

В сентябре охлаждение вод поверхности моря приводит к перестройке полей температуры, солености и плотности с летнего типа на зимний. Этот процесс характеризуется упорядочением распределения температуры, понижающейся к северо-западу; увеличением глубины конвективного перемешивания и толщины однородного слоя; образованием круговоротов циклонического и антициклонического характера; перестройкой полей течений.

В осенне-зимний период в прибрежной зоне поверхностная водная масса характеризуется большой однородностью температуры, что указывает на очень глубокое ветровое перемешивание.

Летом поверхностные слои прогреваются до 22-23° С [89]. Вследствие повышения температуры воды увеличивается скорость окисления и деструкции веществ сброса. Однако усиливается вертикальная стратификация и ослабляется ветровая деятельность, что приводит к локализации материалов сброса.

В прибрежных районах моря часто повторяются резкие внутри суточные колебания температуры воды, связанные с прибрежными апвеллингами.

В зоне мелководного шельфа режим солености определяется соотношением пресных и соленых вод, интенсивностью турбулентного обмена и циркуляцией вод. В зимний период в результате активного перемешивания вод соленость во всем районе однородна (16,5-18,0 ‰). В весенний период в северо-западный район моря в результате паводка рек поступает 60 % общего объема годового речного стока, что вызывает интенсивное опреснение вод в участках моря, примыкающих к устьевым районам. Небольшое опреснение у Керченского пролива и у восточного берега Крыма вызвано проникновением сюда менее соленых вод Азовского моря.

Процессы распреснения вносят существенный вклад в формирование устойчивой стратификации верхнего слоя морских вод, которая подавляет турбулентность и, следовательно, вертикальное смешение.

Температура и соленость определяют величины и распределение плотности вод Черного моря [90]. На глубинах 25-75 м располагается слой скачка плотности, образованного резким перепадом температуры по глубине – термоклинном. Ниже, на глубинах 75-200 м, постоянно присутствует основной скачок плотности, вызванный перепадом солености с 18,0-18,2 до 21,1-21,3 ‰.

Летом ввиду сильного прогрева и ветрового перемешивания термохалинный слой скачка углубляется. Вместе с тем он настолько интенсифицируется, что смешение вод верхнего и нижнего слоев практически не происходит. Обновление вод нижнего слоя происходит за счет

горизонтального обмена с открытым морем в процессе адвекции.

С началом осеннего охлаждения поверхности возникает вертикальная конвекция, слой скачка понижается. Наблюдается смешение верхнего и нижнего слоев. Зимой скачок почти полностью исчезает.

Слои скачка плотности являются потенциальными зонами аккумуляции различных загрязнителей и распространения их в горизонтальной плоскости.

Устойчивые плотностные градиенты в месте дампинга препятствуют турбулентному перемешиванию вод, а также осадению взвешенных компонентов сброса, что вызывает увеличение количества сброшенного материала, остающегося в поверхностных слоях воды. В придонном слое плотностной градиент может ограничивать вертикальную диффузию материалов сброса после удара о дно.

## 2.2. Основные черты динамики вод

Циркуляция вод шельфовой зоны Черного моря имеет много общего с характером циркуляции вод глубинных районов моря, однако она обладает и своими специфическими чертами.

Среднегодовые поверхностные течения имеют преимущественно циклонический характер [91] (рис. 2.1), но реальные течения существенно зависят от направления и скорости приводных ветров в различные сезоны года.

Зимой, как правило, повсеместно преобладают поверхностные течения южных румбов, в весенне-летний период, из-за увеличения стока рек усиливаются течения вдоль западного побережья шельфа, а летом и осенью в центральных и восточных областях шельфа может формироваться антициклонический тип циркуляции [91].

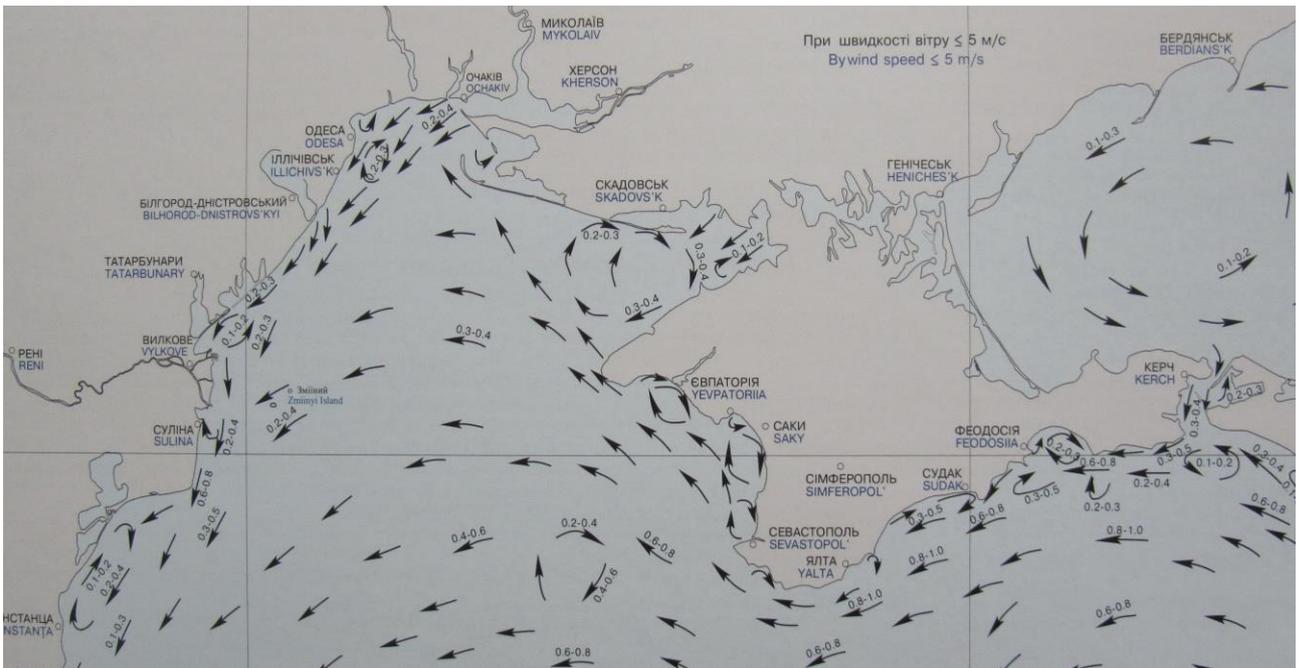


Рис. 2.1. Среднегодовое поле направлений и скоростей поверхностных течений украинской части шельфа Черного моря [92].

Среднегодовое распределение скоростей поверхностных течений представлено на рис. 2.2.

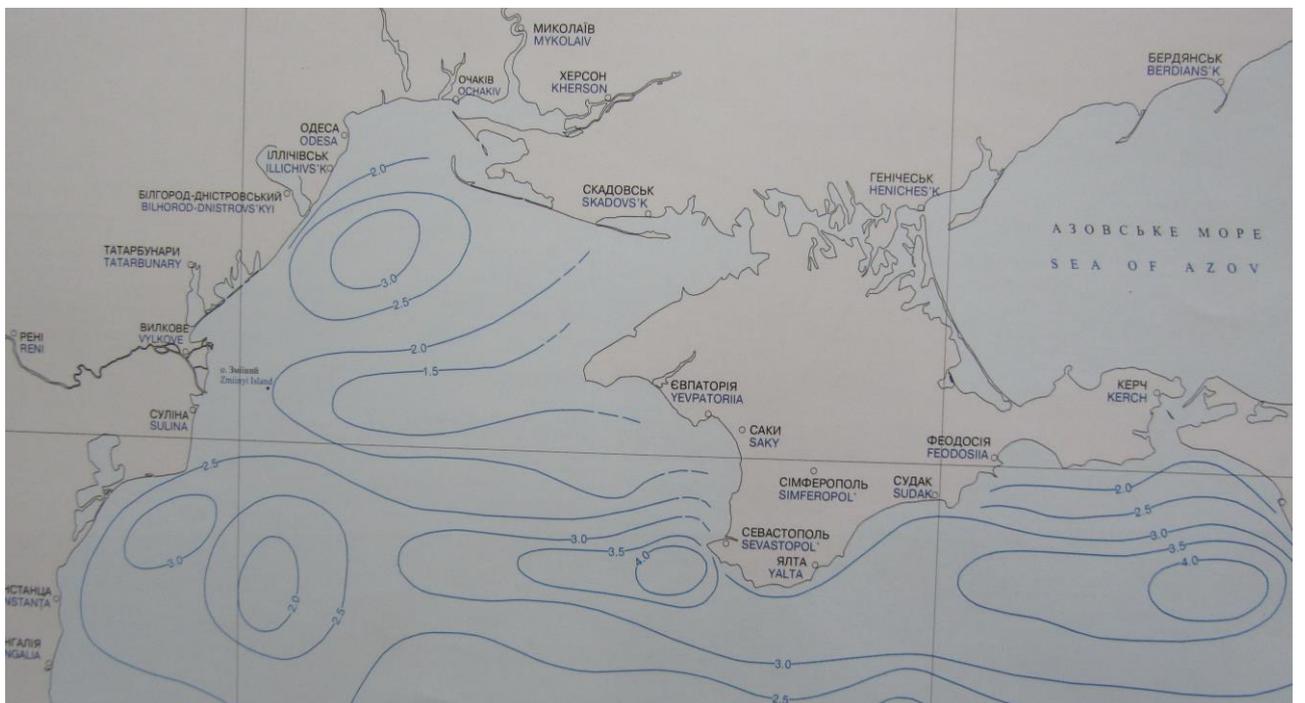


Рис. 2.2. Среднегодовое поле максимальных скоростей поверхностных течений украинской части шельфа Черного моря [92].

Основным элементом крупномасштабной циркуляции вод Черного моря, оказывающей определяющее влияние на динамику вод шельфовой зоны, является струя основного черноморского течения (ОЧТ), меандрирующая с разной степенью интенсивности вдоль свала глубин. В этом динамически активном районе развиваются многочисленные вихревые образования [93].

На СЗШЧМ помимо хорошо обусловленных орографических причин, возникновению вихрей способствуют волновые процессы и гидродинамическая неустойчивость геострофического потока. В зимнее время года, когда вследствие существенно охлаждения вод СЗШЧМ межширотные градиенты на границе с шельфовой областью ослабевают, а зимняя структура шельфовых вод приобретает все более однородный характер, вихреобразование, как правило, ослабевает.

При ветрах северного, северо-восточного и восточного направлений на СЗШЧМ преобладает циклоническая циркуляция, а при южных и юго-западных ветрах – антициклоническая [89, 90]. При циклонической циркуляции ветвь ОЧТ проникает на шельф вдоль западного побережья Крыма, а стоковое течение дунайских вод направлено на юг в непосредственной близости от берега. При антициклоническом движении вод воды Дуная могут широко распространяться по всему шельфу. Локальное антициклоническое движение вод, кроме Каркинитского залива, выделяется также и в Одесском регионе [94].

Сезонная изменчивость характеризуется как преобладание зимой течений западного сектора, соответствующих общей циклонической циркуляции, летом – наоборот.

При отсутствии ветра в северо-западной части моря наблюдается слабая циклоническая система течений. Средние скорости течений достигают в среднем 55-65 см/с. Максимальные скорости течений достигают 80-90 см/с. Для этой части моря характерно уменьшение скорости с глубиной [93].

Основными факторами, определяющими особенности динамики в шельфовой зоне юго-восточной части Крыма, являются [95, 96]:

– наличие потока ОЧТ, направленного на юго-запад вдоль побережья

Крыма;

- неустойчивость ОЧТ, регулярно формирующая циклонические и антициклонические меандры в районе Феодосийского залива, северная периферия которых является вдольбереговым потоком, направленным на запад и юго-запад (циклон) или на восток и северо-восток (антициклон);
- особенности очертания береговой линии;
- сильные ветры, вызывающие сгонно-нагонные эффекты и прибрежный апвеллинг.

В районе Керченского предпроливья наличие струи ОЧТ приводит к развитию между берегом и потоком ОЧТ антициклонических вихревых образований [97–99]. Эти круговороты достигают в диаметре 100 км и проникают до глубины 200-500 м.

Прибрежные течения в районе Керченского предпроливья независимо от сезона имеют возвратно-поступательный вдольбереговой характер в двух противоположных направлениях –  $310^\circ$  и  $130^\circ$  [97–99]. Течения северо-западного сектора преобладают с октября по апрель, их средняя за год продолжительность составляет 3,4-5,6 суток, максимальная в теплое время года (май-октябрь) – 7-8, а в холодное (ноябрь-апрель) – 10-12 суток, минимальная сохраняется в течение всего года – 2 суток. Течения юго-восточного сектора характерны для мая и августа, их средняя за год продолжительность составляет 2,2-6,2 суток, максимальная в мае-октябре – 9-10, а в ноябре-апреле – 3-5 суток, минимальная сохраняется в течение всего года – 2 суток. Разнонаправленные течения способствуют образованию значительного градиента скорости, определяющего хорошие условия перемешивания вблизи дна.

В Черном море, кроме упомянутых видов циркуляции, широкое распространение имеют сгонно-нагонные колебания уровня моря.

Сгонно-нагонные колебания вместе с вдольбереговой циркуляцией и фоновой циклонической циркуляцией создают сложную картину динамики вод.

Зимой складывающееся в центрах циклонических круговоротов благоприятное сочетание гидрологических условий и гидродинамических

факторов вызывает интенсивное конвективное перемешивание, которое положительно влияет на выбор места дампинга. Глубина распространения зимней вертикальной циркуляции в прибрежной зоне достигает 140-160 м. На границе шельфовой зоны в западном и северо-западном районах моря плотностное перемешивание распространяется до горизонтов 170-175 м за счет сползания по склонам вод, охлажденных на северо-западном мелководье, где конвекция проникает до дна [100]. Глубина проникновения зимнего конвективного перемешивания может рассматриваться как характерный вертикальный масштаб дисперсии продуктов сброса в зимний период.

При наличии ледового покрова основную роль в циркуляции вод играет Постоянный черноморский поток, так как воздействие ветра исключается.

Осложнение циркуляционного режима в весенний период года по сравнению с зимним связано с изменениями внутренней термохалинной структуры вод, а именно с появлением двухслойной структуры, и интенсивным распространением по акватории вод паводкового стока [94]. В поверхностном сильно опресненном слое характер течений определяется полем ветра. В нижележащем слое до дна циркуляция вод может существенно отличаться от циркуляции вод поверхностного слоя. Наличие температурной стратификации и присутствие на поверхности распресненных вод затрудняют весной вертикальный обмен.

В летний период отмечается общее ослабление интенсивности переноса водных масс, так как вертикальный турбулентный и диффузионный обмен в этот период затруднен из-за ярко выраженной стратификации вод. Вертикальный обмен происходит в основном двумя путями: при возникновении вертикальной циркуляции вод в открытой части моря вследствие циклонических и антициклонических круговоротов и других зон дивергенций (расхождений) и конвергенций (схождений) течений и при развитии поперечной вертикальной циркуляции прибрежных вод, обусловленной сгонно-нагонными ветрами.

Осенью конвекцию в море вызывает интенсивное охлаждение

поверхностного слоя. Усиление ветров способствует конвективному перемешиванию, что приводит к разрушению вертикальной стратификации. Кроме вертикального обмена, активизируется фоновая горизонтальная циклоническая циркуляция.

Рассмотренные выше характеристики сезонной динамики вод следует учитывать при выборе времени и места сброса.

### 2.3. Ветро-волновые условия

Одним из факторов, влияющих на интенсивность турбулентного перемешивания и, следовательно, на выбор места дампинга, является режим ветра и ветровое волнение.

В холодное время года под влиянием циклонических областей над Черным морем преобладает перенос континентального полярного воздуха, сопровождающийся северо-восточными, северными и северо-западными ветрами со средней месячной скоростью 5,0-6,4 м/с. Развитие сильных (более 10 м/с) и особенно штормовых ветров связано главным образом с прохождением циклонов над морем.

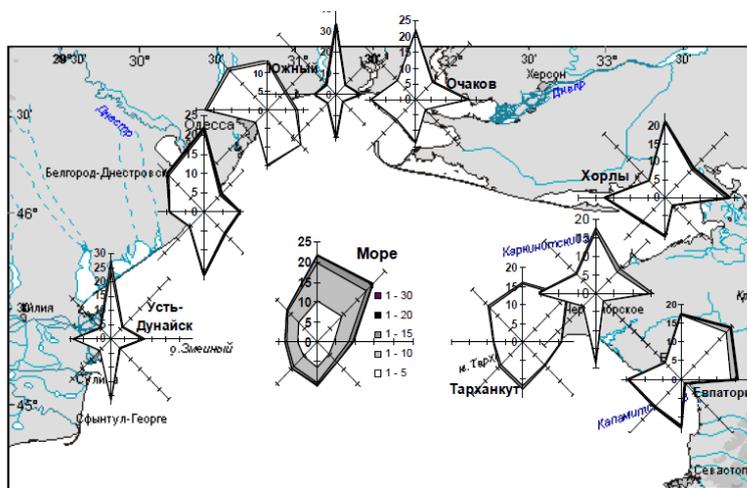
Летом преобладающее влияние Азорского максимума вызывает западные, юго-западные и южные ветры [101]. На побережье преобладает маловетренная погода, когда повторяемость ветра до 5 м/с составляет 60-70 % всех наблюдений. Однако случаи полного штиля на открытых участках побережья очень редки. Небольшая повторяемость штилей связана с бризовой циркуляцией в прибрежной зоне, в результате которой днем ветры дуют с более прохладной водной поверхности на сильно прогретый берег, а ночью – с берега. Наблюдаются бризы с апреля по октябрь, но их наибольшей

повторяемостью характеризуются июль и август. Сильные, в особенности штормовые ветры, летом наблюдаются при прохождении циклонов.

В переходные сезоны создаются условия благоприятные для возникновения юго-восточных и восточных ветров.

На рис. 2.3 представлены средние годовые розы повторяемости ветра, на которых изображены контуры линий суммарной повторяемости и линий, соответствующих повторяемости ветров  $< 10$  м/с. Заштрихованные между ними области соответствуют величинам повторяемости штормовых ветров ( $> 10$  м/с).

а)



б)

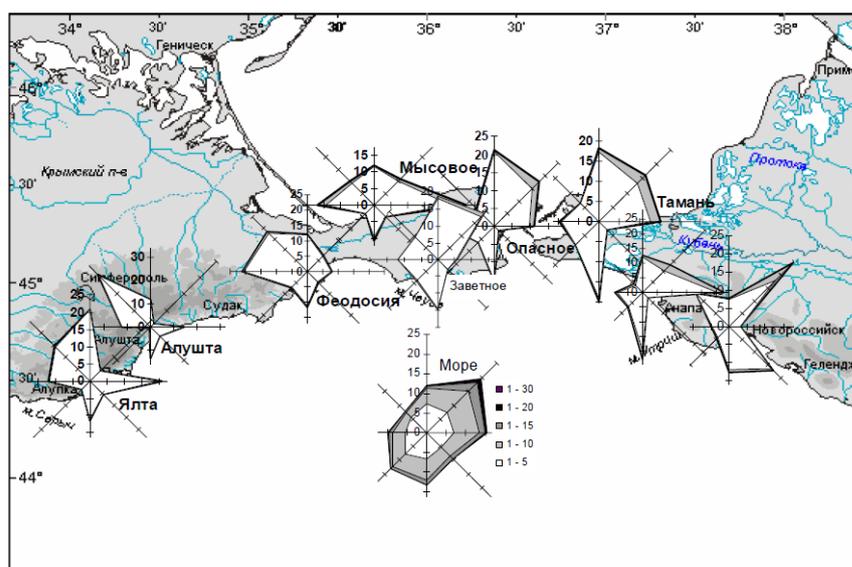


Рис. 2.3. Розы повторяемости (%) ветра по направлениям на береговых станциях и на шельфе северо-западной (а) и северо-восточной (б) частей Черного моря [102].

Северная часть Черного моря характеризуется интенсивной штормовой деятельностью. Большие скорости ветра отмечаются практически во всех частях побережья и во все сезоны года. Тем не менее, выделяются зоны повышенной ветровой активности, где среднемноголетние значения скорости ветра превышают 5 м/с (Усть-Дунайск, Одесса, Хорлы). Однако самые сильные ветры наблюдаются над открытой частью моря, в районах о. Змеиный (6,7 м/с) и устья Дуная, где среднегодовая скорость достигает 7,4 м/с [103, 104].

Скорость ветра имеет хорошо выраженный годовой ход с максимумом в холодный период и минимумом в теплый. Зимой в прибрежной зоне СЗШЧМ диапазон значений средней скорости ветра составляет 5,0-6,4 м/с, летом, соответственно, 3,3-4,6 м/с [105, 106].

У северо-восточного побережья скорости ветра изменяется от 2,7-2,8 м/с на Южном берегу Крыма (ЮБК) до 6-7 м/с в районах Керченского пролива зимой, а летом скорость ветра уменьшается до 1,9-2,4 м/с и 3,3-5,3 м/с соответственно [105, 107].

Максимальные среднемесячные скорости чаще всего наблюдаются в ноябре-марте. Штормовые ветры со скоростью не менее 20 м/с бывают в любое время года и в любом районе побережья. Максимальные скорости зимой и весной могут достигать 25-30 м/с.

Наиболее интенсивные и продолжительные усиления ветра отмечаются в холодную часть года с октября по март. Реже всего сильные ветры отмечаются в летние месяцы. В центральных частях северо-западного и северо-восточного шельфов Черного моря с октября по март преобладают северо-восточные штормы. До мая ветры скоростью более 10 м/с могут действовать от любого направления. В летний период ветры такой силы возможны в северо-западной части, в основном, от северной четверти горизонта, а в северо-восточной – от северо-восточной и юго-восточной четверти.

Наиболее опасными для северо-западного и северо-восточного побережья являются ветры юго-западного, южного и юго-восточного направлений.

В соответствии с особенностями режима ветра, максимальная

интенсивность ветрового волнения приходится на период с октября по март. Во все сезоны наиболее интенсивное ветровое волнение отмечено в районе м. Херсонес. Немногим уступают районы ЮБК (Алушта, Ялта). В прибрежной зоне северо-западной части Черного моря интенсивность ветрового волнения ниже, чем в районах ЮБК, однако и в этом районе отмечены жестокие штормы, особенно у северного побережья (Ильичевск, Одесса, Южный).

У западного побережья СЗШЧМ, в районе Усть-Дунайска, наибольшую повторяемость со стороны моря имеет волнение северного (18,1 %), северо-восточного (13,6 %) и южного (13,5 %) направлений. У северного побережья СЗШЧМ преобладающими направлениями распространения опасного волнения являются южное (23-25 %), юго-восточное и восточное (8,7-9,4 %). В районе Одессы преобладает юго-восточное (18,1 %), южное и восточное направления [102, 105]. На востоке СЗШЧМ наибольшую повторяемость со стороны моря имеет волнение юго-западного (18 %), северо-восточного, северного (15,7-19,5 %) и западного (16,3 %) направлений. У западного побережья Крыма преобладает опасное волнение южного, юго-западного и юго-восточного направлений.

В районе ЮБК чаще всего наблюдается волнение восточного (27 и 39 %), юго-восточного (41 и 28 %) и южного (30 и 32 %) направления.

Наибольшая повторяемость ветра в Керчь-Туапсинском районе приходится на северо-восточное и северное направления и составляет от 16 % до 25 %. [105]. Поскольку основным типом волнения является ветровое (88-94,1 %), преобладающие направления волнения и ветра в Керченском проливе различаются незначительно.

Среднегодовая повторяемость волн опасного явления составляет 6-13,7 %. Максимальная повторяемость таких волн отмечается на побережье Крымского района. На мелководных участках побережья Черного моря и в Керченском проливе опасная высота наблюдается крайне редко и ее повторяемость составляет менее 1 %.

Среднегодовая высота волн колеблется в диапазоне 0,3-0,8 м (рис. 2.4).

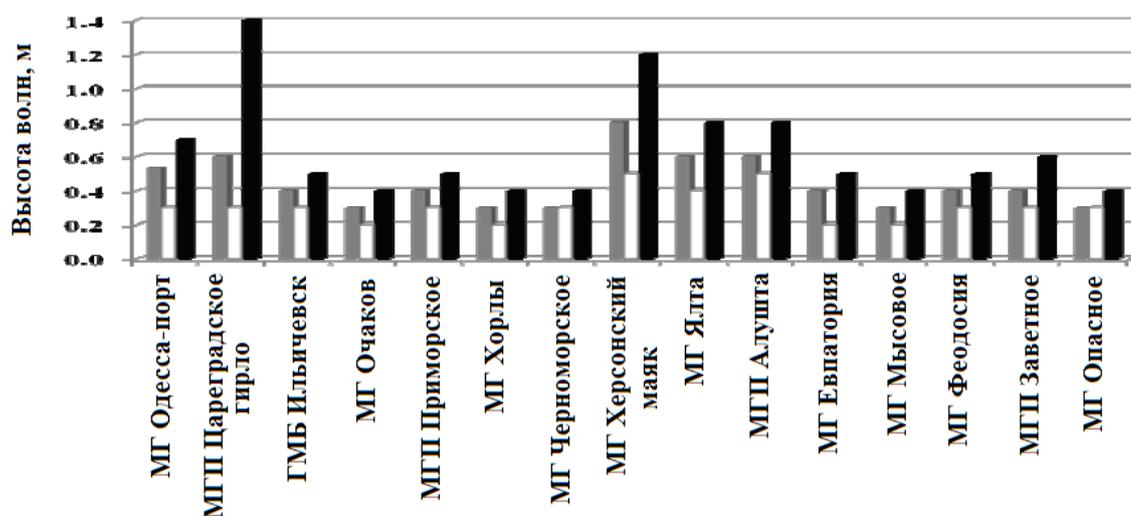


Рис. 2.4. Среднегодовая – ■, среднегодовая минимальная – □, среднегодовая максимальная – ■ высота волн [105].

Наиболее часто наблюдаются волны высотой 0,5 м и ниже, повторяемость которых составляет 70-96 %. При этом несколько больше в лиманах, мелководных заливах, проливе и бухтах (90-96 %). На побережье Крымского района такие волны наблюдаются реже, и их повторяемость составляет не более 42 %, а на ЮБК – около 60 %.

Сезонная изменчивость высоты волн выражена слабо. В теплое и холодное полугодия она существенно не различается и составляет 0,2-0,4 м.

#### 2.4. Рельеф и донные отложения

Особенности геоморфологического и геологического строения позволяют выделить на украинской части шельфа Черного моря три крупных района: северо-западную часть дна, континентальную террасу Южного Крыма и дно Черного моря, прилегающее к Керченскому полуострову (рис. 2.5).

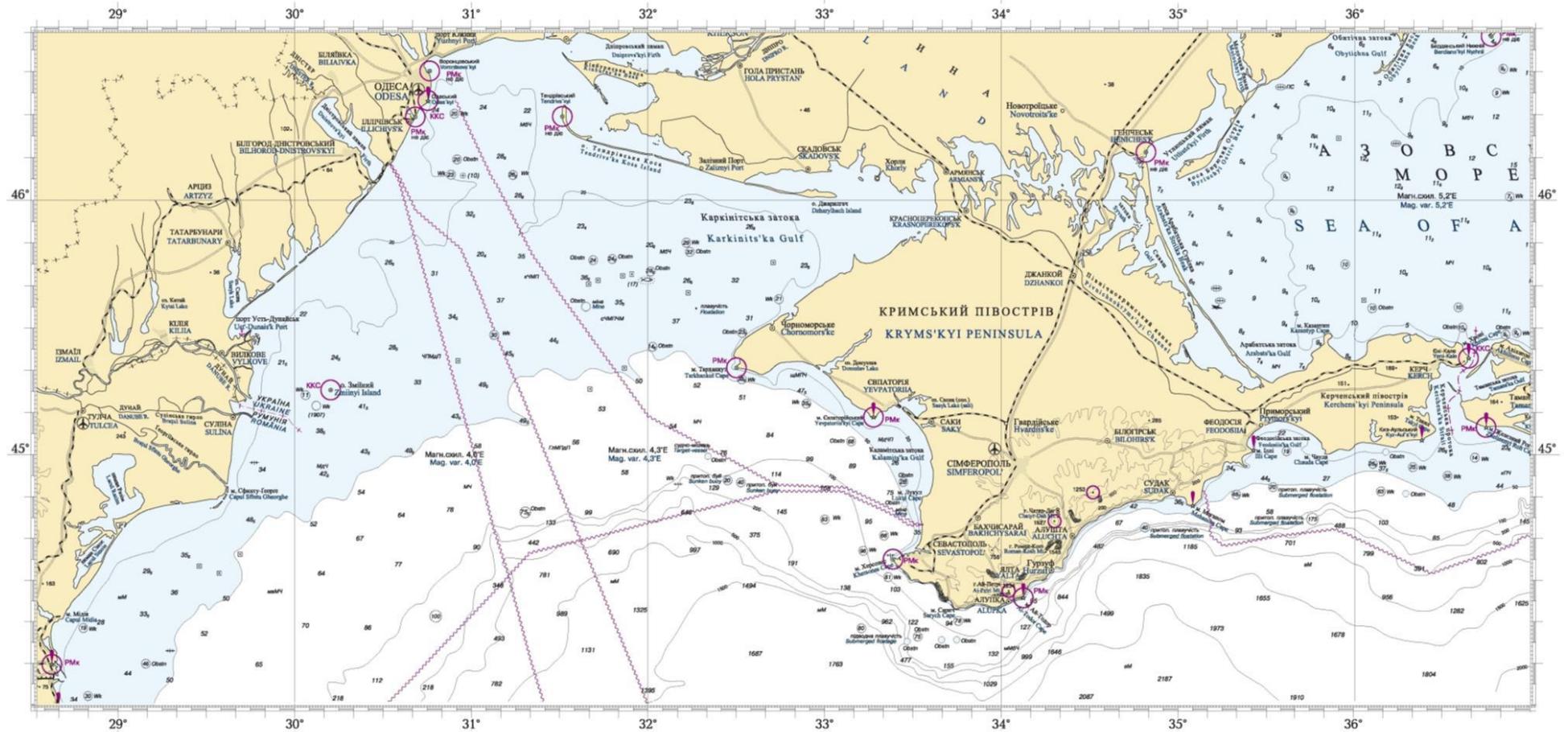


Рис. 2.5. Обзорная карта украинской части шельфа Черного моря [108].

Северо-Западным шельфом Черного моря (СЗШЧМ) называется большое мелководье, расположенное между параллелями 45 и 46,7° с. ш., западной оконечностью Крыма и западным побережьем Черного моря. В данной части моря ширина шельфа достигает значений более 200 км. Глубины составляют 0-100 м, местами – до 160 м [103]. По данным многочисленных геологических экспедиций [109] всю площадь шельфа занимает аллювиальная равнина. В выровненной и пологой части мелководья, прилегающей к берегу зоне глубин 30-40 м, уклон дна составляет 1-2°. Крутизна дна увеличивается к бровке отмели, углы наклона возрастают, достигая значения 10-12° [93, 110].

На фоне плоской равнины шельфа выделяются несколько крупных пологих ложбин, разделенных невысокими подводными возвышенностями. Форма ложбин напоминает хорошо разработанные долины крупных рек. Их ширина достигает 10-15 миль, а относительные превышения разделяющих их плоских возвышенностей составляет 7-10 м. Склоны подводных долин очень пологие, их крутизна редко достигает значений в 1° [110, 111]. Наиболее крупной долиной является Днепровская, она простирается на 280 км от Одесской банки через весь шельф, материковый склон и оканчивается на абиссальном дне. Менее протяженной (240 км) является Днестровская долина. Кроме аллювиальных форм, составляющих основу СЗШЧМ, отмечаются участки абразионных террас, небольшие банки, подводные береговые песчаные валы с амплитудой в несколько метров. Иногда наблюдаются два ряда валов.

Шельф от м. Херсонес до Феодосийского залива резко сужен и ширина его даже в самой широкой западной части между Севастополем и Ялтой не превышает 30 км. Восточнее (между Ялтой и Феодосией) он становится еще уже – от 5 до 10 км. Основная особенность рельефа шельфа здесь – крайне однообразный выровненный преимущественно аккумулятивный характер при значительной крутизне. Уклон дна составляет от 5-6° до 30° [109, 112]. На всем протяжении шельфа выделено всего несколько слабо выраженных изолированных друг от друга валообразных поднятий.

Заметным своеобразием отличается рельеф шельфа Керченского

предпроливья. Ширина шельфа здесь изменяется от 20 до 50 км. Внешний край шельфа находится на глубине около 100 м вблизи Феодосии и 140-160 м против Керченского пролива [103, 112]. Уклон дна составляет 2-5°. Характерной особенностью рельефа дна у пролива является ступенчатость его поверхности. Ступени сменяются четко выраженными уступами, высота которых уменьшается с увеличением глубин от 5 до 10 м. Крутизна уступов обычно больше 10°. В целом поверхность шельфа Керченского предпроливья отличается значительным расчленением с преобладанием мелких форм рельефа. Пологие поднятия в виде гряд чаще всего простираются с юго-запада на северо-восток, реже – в широтном направлении. Эти гряды разделяются широкими понижениями с выровненным аккумулятивным рельефом.

Характеристика рельефа дна является одним из ведущих параметров, влияющим на выбор места дампинга. Его вес как признака определяется в первую очередь формой рельефа и преобладанием той или иной формы рельефа на исследуемой территории. Так, например, замкнутые понижения рельефа являются потенциальными местами накопления продуктов дампинга. Кроме того, необходимо, чтобы донные отложения района отвала по своей структуре соответствовали донным отложениям размещения грунта.

Донные отложения Черного моря представлены всеми гранулометрическими типами, однако на шельфе преобладают ил и глинистый ил. Среди песчаных и илистых отложений в качестве примеси встречается большое количество раковинного материала. В СЗШЧМ доминирующим типом донных отложений являются ракушники, включая раковинные пески и илистые ракушники [113]. Пески и «чистые» ракушники распространены на прибрежном береговом склоне (глубины менее 15-17 м), где раковинный материал подвергается интенсивной волновой переработке, и на вершинных поверхностях подводных возвышенностей (глубины до 25 м), где раковины могут подвергаться волновой переработке. Илистые ракушники распространены обычно на глубинах свыше 25 м в депрессиях рельефа, на основной площади внешнего уступа прибрежной части шельфа и на равнине его центральной части. Вниз по разрезу новочерноморские

илистые ракушники сменяются древнечерноморскими раковинными илами.

На поверхности дна раковинные илы обнажены реже, в основном они распространены на склонах Днепровского желоба и Каркинитской котловины. Большая часть склонов этих депрессий и их днища сложены зеленовато-серыми мелкоалевритовыми илами, часто переходящими вниз по разрезу в глинистые илы. Глинистые илы в продельте Дуная фактически не содержат раковинного материала, имеют темный цвет, часто наблюдаются прослойки почти черных илов.

На шельфе у берегов Крыма преобладают отложения, образованные материалами выветривания скальных пород. Здесь чаще всего встречаются известняковые илы с прослойками глины, но имеются участки дна, покрытые примесью ракушечников.

В распределении осадков Керченского предпроливья характерной особенностью является довольно резкий переход от одного типа к другому. На глубинах 30-80 м распространены песчано-ракушечные осадки с участками чистого ракушечника, песка и илов. Отложения чистого ракушечника образуют полосы, вытянутые в юго-западном направлении и расположенные на грядообразных выступах дна. На глубинах более 80 м дно покрыто илом и глинистым илом.

## 2.5. Гидрохимическая характеристика

Концентрация кислорода в воде обычно изменяется от 6,5 до 11,0 мг/дм<sup>3</sup> при средней величине 8,0 мг/дм<sup>3</sup>. Минимальные зарегистрированные величины содержания кислорода приходятся на летний период. Мощные регулярные сгонные ветры северного и северо-западного направлений формируют в зоне относительного глубоководья районы с наличием гипоксии. Длительность

ветров обуславливает не только низкие концентрации растворенного в воде кислорода и наличие сероводорода, но и гибель гидробионтов на обширных акваториях.

Наблюдения [114–116], произведенные на акватории СЗШЧМ, показали, что в верхних слоях водной толщи основные гидрохимические характеристики соответствуют среднемуголетним (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Показатели качества воды СЗШЧМ [117]**

Показатели	Пределы колебаний	Размерность
O <sub>2</sub>	2,88 – 14,77	мг/дм <sup>3</sup>
pH	7,81 – 8,91	ед.
Фосфор общий	17,0 – 115,0	мкг/дм <sup>3</sup>
Азот аммонийный	60,0 – 260,0	мкг/дм <sup>3</sup>
Нитраты	5,0 – 49,0	мкг/дм <sup>3</sup>
Нитриты	0,0 – 900,0	мкг/дм <sup>3</sup>

В прибрежной акватории СЗШЧМ наблюдается снижение концентраций минеральных форм азота и фосфора и увеличение растворенного органического вещества, особенно органического азота. Содержание биогенных элементов изменяется в широких пределах (табл. 2.1).

Основной формой азота является органическая, на минеральные формы приходится лишь незначительная часть общего содержания азота. Содержание аммонийного азота достаточно невелико и составляет в среднем 0,8 мг/дм<sup>3</sup>.

Преобладающей формой фосфора являются фосфаты. Их концентрация в холодный период года снижается.

Одним из основных видов загрязнения акватории являются НП. Фоновое нефтяное загрязнение акватории в основном представляет собой частично трансформированные, потерявшие легко окисляющиеся фракции НП.

Содержание ТМ находится на фоновом уровне для СЗШЧМ.

Основные гидрофизические и гидрохимические параметры водной среды на участках работ приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Основные гидрофизические и гидрохимические параметры водной среды  
на участках работ [114–116]**

№	Показатель	Ед. изм.	Порты			СЗШЧМ, отвалы		
			«Южный»	ОМТП	ИМТП	«Южный»	ОМТП	ИМТП
1	Температура воды	°С	22,3	24,0	23,6	22,8	23,2	24,1
2	Соленость	‰	14,5	14,5	13,8	14,8	15,0	14,6
3	pH	Ед. pH	8,0	8,1	8,0	8,1	8,0	8,0
4	O <sub>2</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	7,0	7,1	8,7	6,9	7,1	6,9
5	БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	2,3	2,4	2,4	2,0	1,2	1,4
6	Азот нитритный	мг/дм <sup>3</sup>	0,006	0,005	0,008	0,007	0,006	0,006
7	Азот аммиачный	мг/дм <sup>3</sup>	0,7	0,5	0,72	0,8	0,5	0,4
8	Азот нитратный	мг/дм <sup>3</sup>	3,0	3,0	2,73	2,9	3,1	3,0
9	Фосфор общий	мг/дм <sup>3</sup>	0,03	0,04	0,024	0,03	0,04	0,02
10	ВВ	мг/дм <sup>3</sup>	11,8	9,8	7,8	3,7	2,7	1,5
11	Прозрачность	м	1,9	2,0	2,1	2,4	2,2	2,2

Как показал анализ проб воды на содержание ВВ, мутность в них изменялась незначительно и составляла, на акваториях портов порядка 9,7 мг/дм<sup>3</sup>, в районах складирования – 2,0 мг/дм<sup>3</sup>, что практически соответствует фоновым показателям. Концентрации остальных ЗВ на участке складирования находятся на уровне ниже ПДК (табл. 2.2 и 2.3) [114–116].

Таблица 2.3

**Основные химические параметры водной среды на участках работ**

№	Показатели	Ед. изм.	Акватория СЗШЧМ, отвалы			ПДК
			«Южный»	ОМТП	ИМТП	
1	Ртуть	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0001
2	Кадмий	мг/дм <sup>3</sup>	0,002	0,004	0,003	0,005
3	Свинец	мг/дм <sup>3</sup>	0,007	0,005	0,006	0,01
4	Цинк	мг/дм <sup>3</sup>	0,045	0,036	0,041	0,05
5	Медь	мг/дм <sup>3</sup>	0,003	0,002	0,004	0,005
6	Мышьяк	мг/дм <sup>3</sup>	0,005	0,003	0,004	0,01
7	НП	мг/дм <sup>3</sup>	0,037	0,048	0,039	0,05
8	Фенолы	мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	0,0007	0,0005	0,001

Результаты исследований пространственного распределения основных гидрохимических параметров показывают, что исследуемые акватории северо-западной части Черного моря относятся к категории антропогенно-эвтрофированных и характеризуются достаточно высоким содержанием биогенных веществ с преобладанием их органических форм.

## 2.6. Гидробиологическая характеристика

**Фитопланктон.** В рассматриваемом районе фитопланктон представлен 627 видами и внутривидовыми таксонами водорослей, которые относятся к 11 отделам. Его основу составляют диатомовые (35,7 %) и динофитовые (31,2 %) водоросли [118]. Диатомовые водоросли, обитающие в двух биотопах – планктоне и бентосе, представлены морскими, солоноватоводно-морскими и пресноводными, пресноводно-солоноватоводными видами. В настоящее время среди них наибольшим разнообразием характеризуются рода *Chaetoceros*, *Thalassiosira* и *Nitzschia*. Динофитовые водоросли в фитопланктоне представлены в основном морскими видами (81,2 %), численность пресноводных и пресноводно-солоноватоводных видов невелика (18,8 %). Всего они насчитывают 196 видов. Наибольшее видовое разнообразие у этой группы водорослей отмечено для родов *Peridinium*, *Gymnodinium* и *Glenodinium* [119].

Вертикальное распределение фитопланктона обуславливается силой света, необходимой для фотосинтеза. Нижняя граница фитопланктона в прибрежной зоне Черного моря достигает в основном 25 м, максимум развития наблюдается на глубинах до 10 м. В открытой зоне моря нижняя граница распространения фитопланктона лежит на глубине 75 м, редко 100 м.

Качественный состав и количество фитопланктона изменяются в

зависимости от сезона или года. Весенний фитопланктон обычно представлен диатомовыми водорослями. Летом удельный вес диатомовых в общей биомассе фитопланктона несколько уменьшается и возрастает роль жгутиковых и перидиниевых водорослей родов *Cymnodinium*, *Peridinium*, *Goniaulax*. В июле достаточно высок уровень развития мелких голых и крупных панцирных перидиней. К сентябрю увеличивается доля мелких панцирных перидиней с объемом клетки менее  $2000 \text{ мкм}^3$  видов *Exuviaella cordata*, *Goniaulax minima*. Таким образом, в конце осени и начале зимы в планктоне сохраняется небольшое количество мелких голых перидиней, отдельные клетки и короткие цепочки *Chaetoceros*, но основная масса фитопланктона представлена панцирными перидиниями, кремнежгутиковыми и кокколитофоридами. В прибрежных районах, подверженных влиянию речного стока, к перидиниевым водорослям в теплое время года нередко присоединяются синезеленые.

Средние значения биомассы водорослей, минимальные в апреле и июне (до  $1 \text{ г/м}^3$ ), возрастают в июле ( $3-5 \text{ г/м}^3$ ) и достигают максимума в августе ( $8-9 \text{ г/м}^3$ ). В сентябре происходит снижение биомассы фитопланктона до  $2 \text{ г/м}^3$ .

Таким образом, количественное развитие диатомовых водорослей имеет зимне-весенний максимум и редко еще и осенний, пиропитовые же водоросли развиваются преимущественно летом и реже осенью, но биомасса их вследствие малых размеров многих видов остается меньшей.

**Зоопланктон.** В составе черноморского зоопланктона насчитывается около 120 видов организмов, а также 20 видов пелагических личинок донных беспозвоночных [120].

Среди представителей микрозоопланктона важную роль играют простейшие, потребляющие бактерии, нанобактерии и эукариотные водоросли. В их число входят многие виды коловраток и инфузории.

В составе планктона идентифицировано более 167 форм инфузорий, из которых 125 определены до вида [121]. Господствующее положение занимают инфузории из классов *Oligotrichea*, *Litostomatea* и *Nassophore*. Несколько видов, интенсивно развиваясь в течение всего года, формируют ядро сообщества, а

именно: *Myrionecta rubra*, *Pelagostrobilidium spirale*, *Strombidium vestitum*, *S. emergens*, *S. conicoides*, некоторые виды родов *Holophrya* и *Urotricha*.

Структура микрозоопланктона представлена организмами морского (60 %), солоноватоводного (11 %), эвригалинного (19,5 %) и пресноводного (9,5 %) комплексов. Это соотношение относительно постоянно в течение года. К весне обычно незначительно возрастает доля эвригалинных и пресноводных видов – *Holophrya nigricans*, *Bursellopsis truncata*, *Rimostrombidium velox*, *R. caudatum*, *Askenasia stellaris*, *Urotricha* spp [121–123].

Всего отмечено 247 видов мезо- и макрозоопланктона, включая пресноводные, солоноватоводные и морские организмы [118]. Общая численность их таксонов не превышает 160, из них голопланктонные формы составляют 63, а меропланктонные – 37 %. Из голопланктонных форм наибольшее количество таксонов имеют коловратки (20 %), ветвистоусые и каланоиды (по 9 %), а из меропланктонных – многощетинковые черви (10,6 %), двустворчатые (10 %) и брюхоногие (5,9 %) моллюски.

Основную часть зоопланктона по численности и биомассе особенно в прибрежной зоне составляет меропланктон.

Развитие зоопланктона подчинено четкой сезонной динамике. Весенний период характеризуется самой высокой численностью (117 тыс. экз. м<sup>-3</sup>) зоопланктона, в котором доминируют пресноводные и солоноватоводные формы (39 % от общего числа таксонов). Эти два комплекса организмов играют большую роль в общей численности (89 %) и биомассе (64 %) сообщества. Доминантное положение по численности и биомассе занимают коловратки, среди которых особо выделяется синхета (81 % по численности и 44,5 % по биомассе). Значительную роль играют личинки бентосных животных: усоногих раков, многощетинковых червей, двустворчатых и брюхоногих моллюсков.

Летом видовое разнообразие несколько уменьшается (34 таксона). Из структуры сообщества выпадает ряд пресноводных видов, а численность оставшихся резко снижается. Сокращается также развитие холодноводных морских форм (калянус, псевдокалянус, подон). Представители

солонатоводного и пресноводного комплексов составляют 23,5 % от общего числа таксонов. На их долю по численности приходится 18 %, а по биомассе 0,7 %. Доминантное положение по численности и биомассе занимают ночесветка (52,2 % по численности и 66,5 % по биомассе) и гребневик мнемнопсис (29,89 % по биомассе). Продолжают играть значительную роль личинки бентосных животных. Общая численность зоопланктона снижается в 6 раз, а биомасса возрастает почти в 3 раза.

Осенью видовое разнообразие сокращается (20 таксонов). Из структуры сообщества полностью исчезают представители пресноводного комплекса, а солонатоводный представлен только синхетой (14 % по численности). По сравнению с летом несколько возрастает роль акарции и личинок усоногих раков. Более чем в 5 раз возрастает численность мнемнопсиса, а биомасса – в 8 раз. Значительно (в 9 раз по численности и в 16 раз по биомассе) сокращается развитие ночесветки. По численности доминируют личинки усоногих раков (28 %), а по биомассе – мнемнопсис (97 %). По сравнению с летом общая численность зоопланктона сократилась в 2 раза, а биомасса, наоборот, возросла в 2 раза и является самой высокой среди других сезонов.

Зимой видовое разнообразие такое же, как и летом. Представители пресноводного комплекса, как и летом, отсутствуют. Солонатоводный комплекс представлен синхетой, но ее роль в сообществе еще более низкая, чем в летний период. Несколько возрастает роль ночесветки (45 % по численности и 84 % по биомассе), она и становится доминирующей в сообществе. Значительную роль продолжают играть личинки усоногих раков. Общая численность зоопланктона остается на уровне летней, а биомасса сокращается в 16 раз и является самой низкой.

Время проведения работ по складированию донного грунта необходимо выбирать таким образом, чтобы воздействие на природную среду было минимальными. Необходимо учитывать сезонную динамику развития фито- и зоопланктона (табл. 2.4).

**Периоды максимального развития фито- и зоопланктона в СЗШЧМ [118, 119, 123]**

Наименование	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Фитопланктон												
Зоопланктон												

**Бентос.** На шельфе Черного моря зарегистрировано 305 таксонов макробентоса (червей – 98, ракообразных – 102, моллюсков – 68, прочих – 36) [118, 124]. Наибольшего развития достигли эвригалинные, эвритермные, эвриоксибионтные и эвритопные виды. Подавляющее число видов бентосных животных имеют средиземноморско-атлантическое происхождение.

Основу численности макрозообентоса в прибрежной зоне составляют ракообразные, полихеты и двустворчатые моллюски, основу биомассы – моллюски, ракообразные и полихеты. С увеличением глубины показатели ракообразных резко снижаются. На глубине более 10 м на илистых грунтах, как правило, доминируют полихеты, на песчано-ракушечных – двустворчатые моллюски. На глубинах 15-50 м вдоль всего морского побережья развит мидиевый биоценоз. На некоторых участках биомасса их превышает 4 кг/м<sup>2</sup>.

В нижней зоне сублиторали на глубинах 50-100 м развит биоценоз фазеолины. Главный компонент – двустворчатый моллюск модиолус фазеолинус. На глубине более 100 м биоценоз резко обедняется, бентосные животные встречаются единично.

К постоянным компонентам мейофауны в Черном море относятся такие группы, как нематоды, гастротрихи, киноринхи, гарпактикоиды, галакариды, фораминиферы, тихоходки и др. Наиболее разнообразна мейофауна крупнозернистых песков, представленная 9 таксонами (21 вид); в среднезернистых (36 видов) встречаются полихеты, архианнелиды; в мелкозернистых (51 вид) получают развитие турбеллярии, нематоды, олигохеты, гастротрихи и гарпактикоиды [125]. По мере продвижения от берега к глубоководным участкам толщина слоя грунта, населенного микро-, мейо- и макрозообентосными организмами, уменьшается, и в зонах стагнации

бентосные гидробионты обитают преимущественно на его поверхности.

Как говорилось ранее, организмы бентоса подвергаются наибольшему отрицательному воздействию при дампинге, поэтому для морского отвала грунта необходимо выбирать районы, где природные условия характеризуются бедным видовым разнообразием и низкой биомассой организмов бентоса.

Время проведения работ по складированию донного грунта также играет большую роль с точки зрения воздействия на природную среду. Для бентоса наиболее вредными являются мероприятия, выполняемые в летний сезон, на который приходится период размножения бентосных животных (наблюдается максимальные значения биомассы). Осенью происходит уменьшение биомассы бентоса и его разнообразия. Зимой у большинства бентосных животных замедляется или приостанавливается рост, они не размножаются. Начало интенсивного роста и размножения многих видов отмечается в марте-апреле.

**Ихтиофауна.** Из 150 видов и подвидов рыб, обитающих на шельфе Черного моря, основная часть представлена видами средиземноморского происхождения (60-70 %) [118]. На долю второй по количеству видов группы – понто-каспийских реликтов, приходится 10-25 %. К ним относятся осетровые, сельди, тюлька, бычки, перкарина. Немалая роль в составе ихтиофауны принадлежит рыбам, образующим холодноводный комплекс. К их числу относят акулу катрана, шпрота, или черноморскую кильку, голыша, или мерланга (мерланку), черноморского лосося, или кумжу. Особое место в составе ихтиофауны занимают рыбы-вселенцы: кефаль пиленгас, солнечник.

Лиманы, приустьевые акватории и шельф характеризуются наличием пресноводных и проходных рыб. В отдельную подгруппу могут быть объединены полупроходные рыбы. Из пресноводных, проходных и полупроходных карповых на шельфе встречаются рыбец, шемая, лещ, сазан, чехонь, тарань, сом, щука, судак и др. Большую группу рыб, распространенных в лиманах и опресненных районах шельфа, составляют солоноватоводные виды: тюлька, перкарина и большая группа бычковых рыб.

Морские умеренноводные рыбы представлены 8 видами: акула катран,

скат лисица, шпрот, камбала глосса, голыш, трехиглая колюшка, лосось, угорь.

Наиболее массовую группу рыб представляют морские теплолюбивые рыбы. Среди них есть очень эвригалинные формы: морские иглы, кефали и др.

Во всех прибрежных районах преобладают придонно-бентосные формы. Самыми многочисленными донными видами рыб являются бычки: кругляк, рыжик, ратан и кнут. В последние годы в прибрежной ихтиофауне заметную роль стала играть кефаль пиленгас.

Несмотря на сокращения общих запасов, наиболее важными промысловыми рыбами рассматриваемых вод являются хамса, шпрот, ставрида, атерина, голыш, акула катран, сельдь, кефали, бычки, камбала калкан и др.

Для определения оптимальных периодов проведения дноуглубительных работ необходимо учитывать сроки нереста основных промысловых видов рыб, размножающихся в районе (табл. 2.5), с целью снижения неблагоприятного воздействия на их репродукционные процессы.

Таблица 2.5

**Сроки массового нереста основных объектов промысла СЗШЧМ [114–116]**

Виды водных живых ресурсов	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Камбала глосса		■	■	■								
Камбала калкан				■	■							
Бычок мартовик			■	■								
Бычок бубырь				■	■	■	■	■				
Бычок песочник					■	■	■					
Шпрот	■	■	■							■	■	■
Анчоус					■	■	■	■				
Морской язык	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Как видно из табл. 2.5, максимальный ущерб рыбному хозяйству будет наноситься в апреле-мае. В связи с этим в указанные месяцы сброс грунтов в отвалы должен быть минимальным, что позволит существенно снизить негативное воздействие на водные живые ресурсы Черного моря.

## 2.7. Характеристика подводных отвалов грунтов дноуглубления и степень загрязнения участков складирования

На украинской части шельфа Черного моря дноуглубление осуществляется с применением только традиционных способов утилизации – дампинг грунтов дноуглубления на подводные отвалы (табл. 2.6-2.7, рис. 2.6-2.10). Согласно рис. 2.9 I и II классы загрязнения грунтов (чрезвычайно и очень грязные) распространены в районах свалок Каркинитского, Каламитского, Феодосийского заливов, Керченской предпроливной зоне.

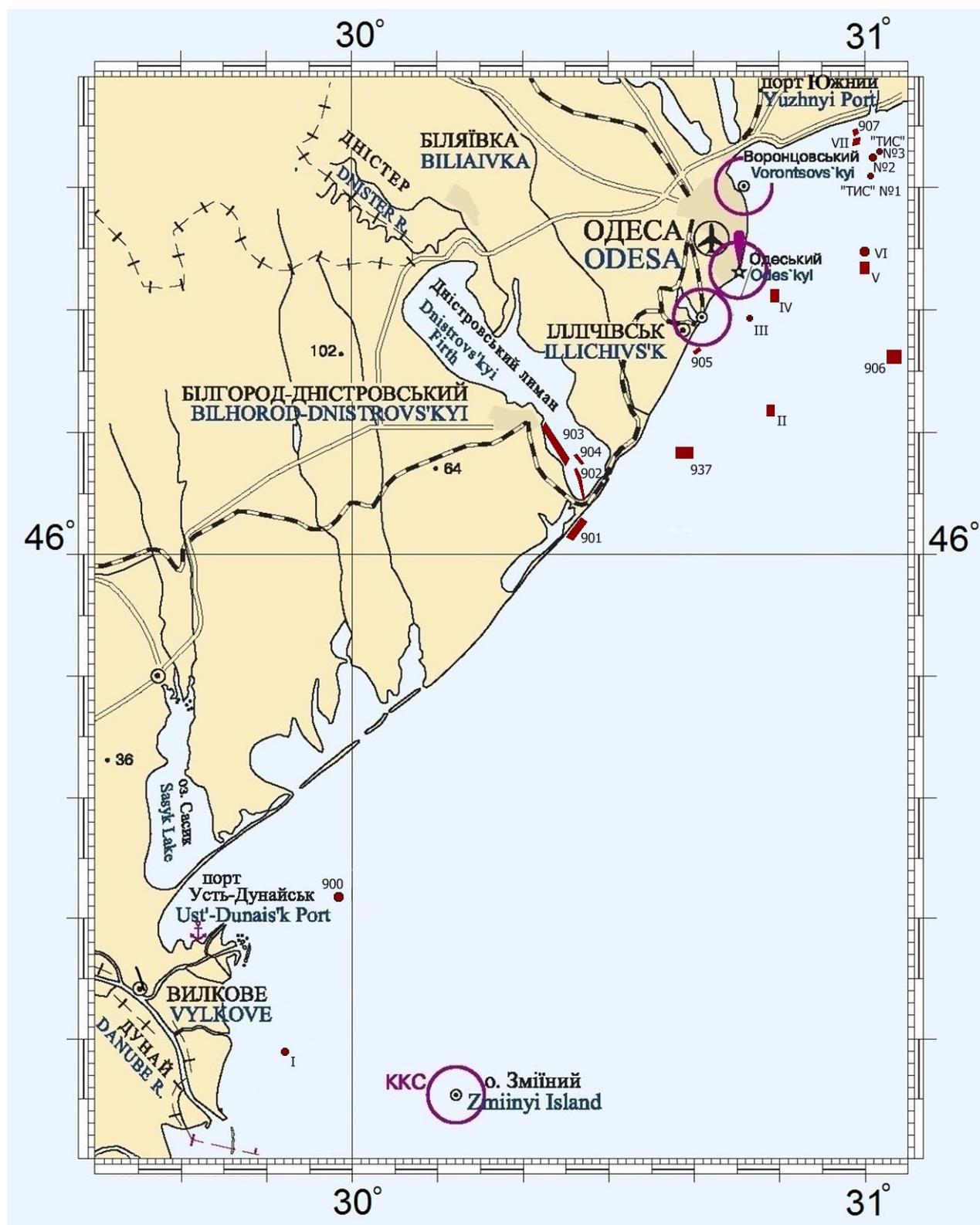
72 % исследуемых свалок относятся к I и II категориям (чрезвычайно грязные и очень грязные морские воды) (рис. 2.10).

Таблица 2.6

### Подводные отвалы грунтов дноуглубления СЗШЧМ

Район	Координаты отвала (конфигурация)
<i>I</i>	<i>2</i>
<b>Подход к дельте р. Дунай</b>	
Район № 900 [126]	Район ограничен окружностью радиусом 6 кбт с центром в точке 45°32,0'00" N, 29°58,4'00" E
Действующий с 2003 г. (I) [127]	Район ограничен окружностью радиусом 5 кбт с центром в точке 45°19'13" N, 29°51'58" E
<b>Подход к Днестровско-Цареградскому гирлу</b>	
Район № 901 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°01,74'00" N, 30°25,14'00" E 2) 46°03,14'00" N, 30°26,78'00" E 3) 46°02,85'00" N, 30°27,39'00" E 4) 46°01,36'00" N, 30°25,97'00" E
<b>Днестровский лиман</b>	
Район № 902 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°04'43,7" N, 30°27'30,3" E 2) 46°06'31,2" N, 30°26'48,3" E 3) 46°07'04,2" N, 30°26'21,3" E 4) 46°07'14,2" N, 30°26'36,3" E 5) 46°06'41,2" N, 30°27'14,3" E 6) 46°04'43,7" N, 30°27'52,3" E
Район № 903 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°10'33,2" N, 30°22'41,8" E 2) 46°08'02,7" N, 30°25'36,3" E 3) 46°07'50,2" N, 30°25'12,3" E 4) 46°10'30,4" N, 30°22'28,8" E
Район № 904 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°07'35" N, 30°27'12" E 2) 46°08'17" N, 30°26'18" E 3) 46°08'23" N, 30°26'33" E 4) 46°07'41" N, 30°27'27" E

1	2
<b>К северу от банки Днестровская</b>	
Район № 937 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°08,2'00" N, 30°38,0'00" E 2) 46°09,0'00" N, 30°38,0'00" E 3) 46°09,0'00" N, 30°39,9'00" E 4) 46°08,2'00" N, 30°39,9'00" E
<b>Подход к Сухому лиману</b>	
Район № 905 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°16,54'00" N, 30°40,06'00" E 2) 46°16,99'00" N, 30°40,46'00" E 3) 46°16,89'00" N, 30°40,86'00" E 4) 46°16,39'00" N, 30°40,36'00" E
<b>Район ИМТП</b>	
Район № 906 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°15,8'00" N, 31°02,7'00" E 2) 46°16,8'00" N, 31°02,7'00" E 3) 46°16,8'00" N, 31°04,2'00" E 4) 46°15,8'00" N, 31°04,2'00" E
К югу от ИМТП (II) [128]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°12' 30" N 30°48' 30" E 2) 46°12' 30" N 30°49' 30" E 3) 46°11' 30" N 30°49' 30" E 4) 46°11' 30" N 30°48' 30" E)
К востоку от ИМТП (III) [114]	Район ограничен окружностью радиусом 550 м с центром в точке 45°19'28" N, 30°46'48" E
<b>Морские подводные отвалы порта «Южный»</b>	
Район № 907 [126]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°34'16,0" N, 30°58'41,1" E 2) 46°34'43,6" N, 30°58'31,5" E 3) 46°34'50,2" N, 30°59'00,3" E 4) 46°34'29,2" N, 30°59'09,3" E 5) 46°34'19,0" N, 30°58'57,3" E
Морской отвал VII (с 2009) [129]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°33'53"N, 30°58'33"E 2) 46°34'05"N, 30°59'22"E 3) 46°33'45"N, 30°59'16"E 4) 46°33'32"N, 30°58'27"E
Морской отвал «ТИС» № 1 [129]	Район ограничен окружностью радиусом 500 м с центром в точке 46°31'11,6" N, 31°00'48,5" E
Морской отвал «ТИС» № 2 [129]	Район ограничен окружностью радиусом 700 м с центром в точке 46°32'39,9" N, 31°00'52,0" E
Морской отвал «ТИС» № 3 [129]	Район ограничен окружностью радиусом 500 м с центром в точке 46°33'01,0" N, 31°01'39,8" E
VI [115] (с 2011 г.)	Район ограничен окружностью радиусом 1,2 км с центром в точке 46°24'48" N, 31°00'00" E
<b>Морские подводные отвалы ОМТП</b>	
Морской отвал IV [130]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°24'08" N, 31°00'30" E 2) 46°24'08" N, 30°59'30" E 3) 46°23'08" N, 31°59'30" E 4) 46°23'08" N, 31°00'30" E
Морской отвал (с 2011 г.) V [114]	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°21'40" N, 30°49'00" E 2) 46°21'40" N, 30°50'00" E 3) 46°20'40" N, 30°50'00" E 4) 46°20'40" N, 30°49'00" E



### Условные обозначения

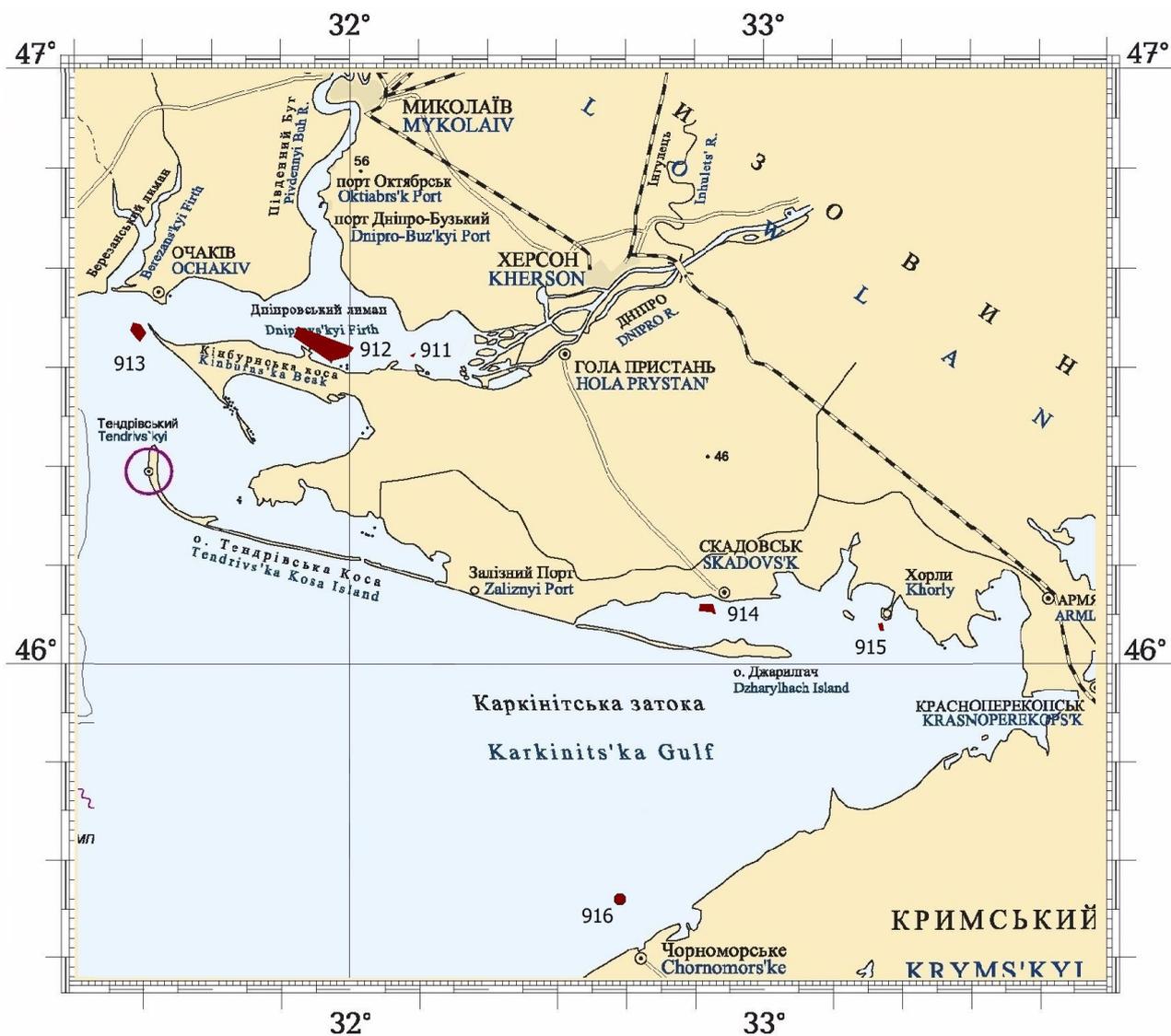
- – конфигурация подводного отвала (координаты представлены в табл. 2.6)
- 937 – номер подводного отвала

Рис. 2.6. Схема расположения подводных отвалов грунтов дноуглубления СЗШЧМ [108 с дополнениями автора].

**Подводные отвалы грунтов дноуглубления  
украинской части шельфа Черного моря [126]**

Район	Координаты отвала (конфигурация)
<i>1</i>	<i>2</i>
<b>Днепровский лиман</b>	
Район № 911	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) на 80° в 5,1 кбт от переднего маяка Станислав-Аджигольский; 2) на 302,9° в 1,13 милях от точки 1; 3) на 77,2° в 1,88 милях от точки 2; 4) на 205° в 1,02 милях от точки 3
Район № 912	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°34,19'00" N, 31°52,47'00" E    4) 46°30,96'00" N, 31°57,31'00" E 2) 46°32,15'00" N, 32°00,26'00" E    5) 46°33,27'00" N, 31°51,96'00" E 3) 46°31,04'00" N, 31°59,91'00" E
<b>Подход к Днепровскому лиману. Западнее Кинбурнской косы</b>	
Район № 913	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°34,29'00" N, 31°28,62'00" E    4) 46°32,76'00" N, 31°29,80'00" E 2) 46°34,21'00" N, 31°29,81'00" E    5) 46°32,96'00" N, 31°28,99'00" E 3) 46°33,54'00" N, 31°30,56'00" E    6) 46°33,62'00" N, 31°28,20'00" E
<b>Каркинитский залив</b>	
Район № 914	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°05'35,3" N, 32°50'41,8" E    4) 46°05'06,5" N, 32°52'43,0" E 2) 46°06'02,3" N, 32°50'41,8" E    5) 46°05'05,3" N, 32°52'25,0" E 3) 46°06'02,9" N, 32°52'16,6" E    6) 46°05'35,3" N, 32°52'12,5" E
Район № 915	Район ограничен линиями, соединяющими точки: 1) 46°03,99'00" N, 33°17,08'00" E    3) 46°03,54'00" N, 33°16,48'00" E 2) 46°03,54'00" N, 33°16,94'00" E    4) 46°03,99'00" N, 33°16,63'00" E
Район № 916	Район ограничен окружностью радиусом 5 кбт с центром в точке 45°35,7'00" N, 32°39,1'00" E
<b>Подход к озеру Донузлав с юга</b>	
Район № 917	Район ограничен окружностью радиусом 5 кбт с центром в точке 45°14'29" N, 32°58'13" E
<b>К югу от мыса Евпаторийский</b>	
Район № 918	Район ограничен окружностью радиусом 2 кбт с центром в точке 45°06,5'00" N, 33°15,9'00" E
<b>К западу от мыса Херсонес</b>	
Район № 919	Район ограничен окружностью радиусом 1,5 мили с центром в точке 44°32'00" N, 33°05'00" E
<b>Подход к Ялтинскому заливу</b>	
Район № 920	Район ограничен окружностью радиусом 1,5 кбт с центром в точке 44°26'00" N, 34°15,1'00" E

1	2
<b>Феодосийская бухта</b>	
Район № 921	Район ограничен окружностью радиусом 1 кбт с центром в точке 45°01'36,6" N, 35°24'02,4" E
<b>К югу от мыса Кыз-Аул</b>	
Район № 939	Район ограничен окружностью радиусом 5 кбт с центром в точке 44°51'00" N, 36°24'00" E



### Условные обозначения

- – конфигурация подводного отвала (координаты представлены в табл. 2.7)
- 937 – номер подводного отвала

Рис. 2.7. Схема расположения подводных отвалов грунтов дноуглубления украинской части шельфа Черного моря [108 с дополнениями автора].

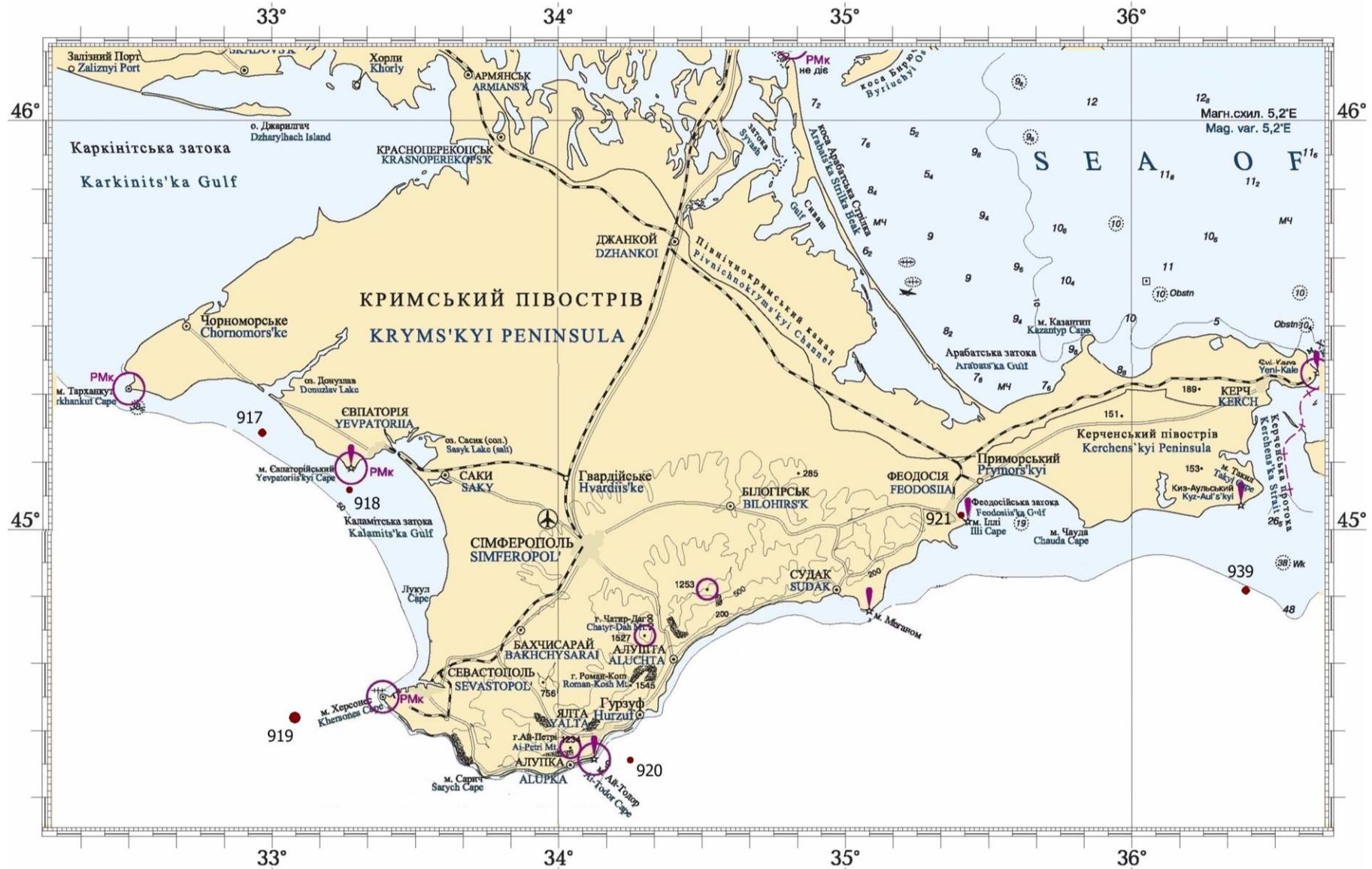


Рис. 2.8. Схема расположения подводных отвалов грунтов дноуглубления: ● – конфигурация подводного отвала (координаты представлены в табл. 2.7); 919 – номер подводного отвала [108 с дополнениями автора].

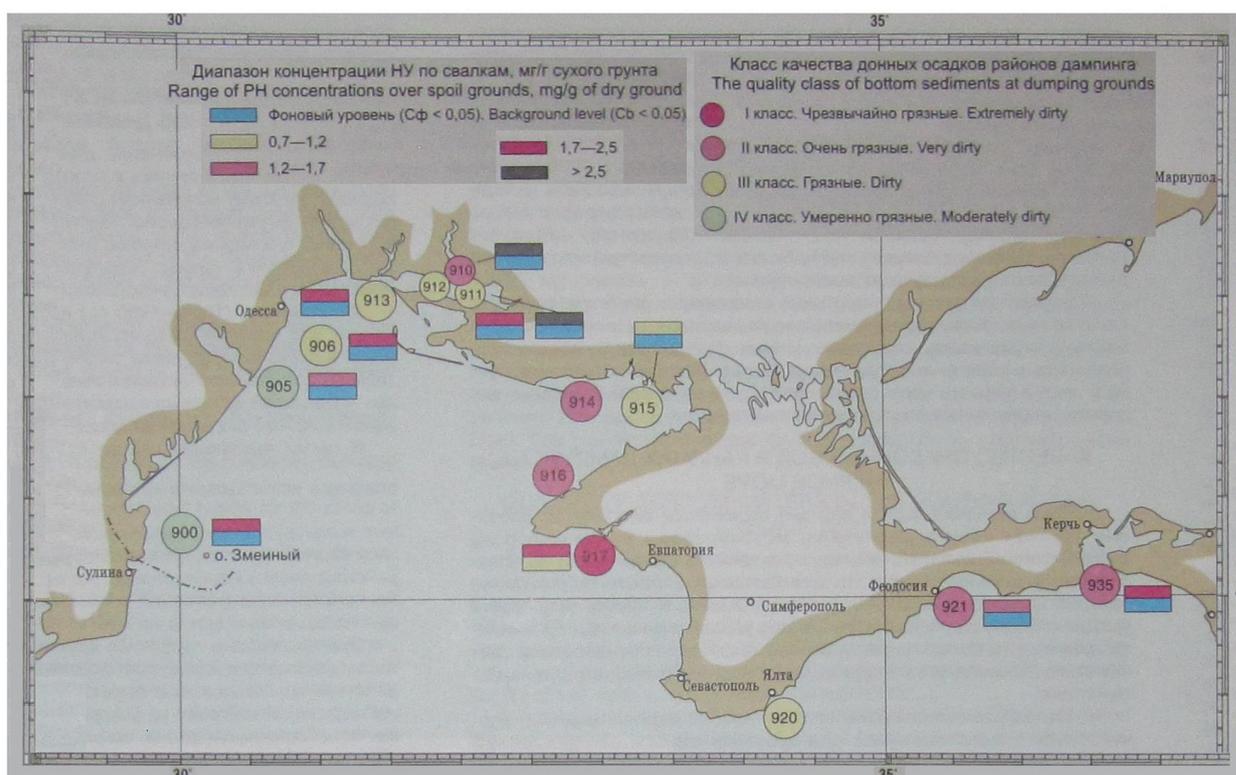


Рис. 2.9. Нефтяные углеводороды в донных осадках районов дампинга [131].

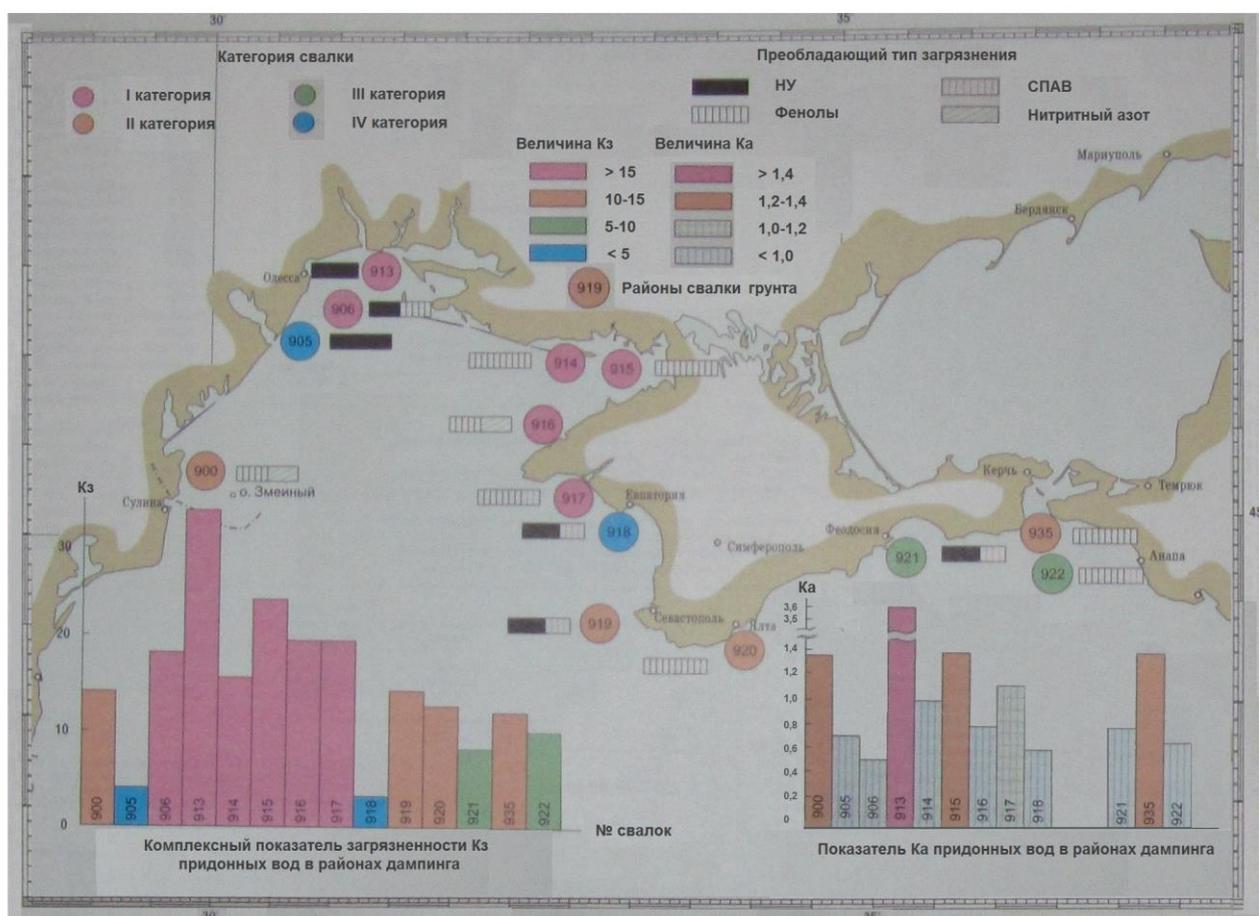


Рис. 2.10. Качество придонных вод в районах дампинга [131].

**Глубоководный судовой ход (ГСХ) Дунай – Черное море.** Общая протяженность ГСХ Дунай – Черное море составляет 172 км. Морской подходной канал (МПК) (длина – 3,4 км, ширина по дну – 100 м, глубина – 8,7-9,5 м) – единственный искусственный участок украинского судового хода. На трассе МПК до глубины 5,0 м залегает мелкий песок, ниже – суглинки.

Объемы разработанного и складированного грунта при строительстве и эксплуатации ГСХ Дунай – Черное море на украинском участке дельты за 2004-2011 гг. представлены в табл. Б.1-Б.2 (Приложение Б).

Общий объем выполненных дноуглубительных работ на баровой части ГСХ Дунай – Черное море в 2011 года составил 802 тыс. м<sup>3</sup> [127]. Гидротехнические работы велись самоотвозным всасывающим землесосом.

Результаты наблюдений, выполненных в октябре 2011 г. на взморье Дуная, представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

**Гранулометрический состав грунтов дноуглубления [127]**

№ пробы	Литоло- гия	Содержание фракций, %						
		1-0,5 мм	0,5- 0,25 мм	0,25- 0,10 мм	0,10- 0,05 мм	0,05- 0,01 мм	0,01- 0,005 мм	менее 0,005 мм
1	ил	-	-	10,25	2,18	37,82	17,99	31,76
2	песок	2,14	0,75	83,08	2,85	5,02	2,91	3,25
3	песок	0,01	0,61	79,25	3,8	7,12	2,0	7,12
4	алеврит	-	0,18	20,72	18,18	24,99	7,48	28,45
5	песок	-	0,47	41,86	9,91	19,87	6,04	21,85
6	песок	0,69	0,59	82,19	6,99	5,16	1,2	3,18
7	песок	1,24	0,82	61,38	14,78	11,73	1,66	8,39
8	песок	0,32	0,54	66,20	5,26	10,71	1,55	15,44
9	песок	1,22	0,46	56,28	5,76	10,7	3,6	21,98
10	ил	-	0,26	8,15	14,74	26,35	10,25	38,66
11	песок	1,12	-	56,41	9,18	20,71	8,4	4,18

Результаты химического анализа проб донных отложений взморья Дуная приведены в табл. 2.9.

**Содержание ЗВ (мг/кг сухого грунта) в донных отложениях  
взморья Дуная в октябре 2011 г. [127]**

№ станции	Глубина места сброса, м	Ртуть, мг/кг	Кадмий, мг/кг	Свинец, мг/кг	Медь, мг/кг	Цинк, мг/кг	Мышьяк, мг/кг	Фенолы, мг/кг	НП, мг/кг
1	7,0	0,182	0,18	39,3	51,3	115	8,29	0,30	440
2	6,5	0,102	0,05	27,5	6,60	40,0	6,26	0,32	100
3	7,0	0,134	0,06	20,6	6,89	38,4	4,74	0,25	130
4	6,0	0,149	0,10	35,6	19,5	70,0	9,19	0,45	200
5	8,0	0,331	0,09	28,8	21,4	66,6	8,69	0,31	200
6	8,0	0,189	0,07	6,48	19,0	63,8	11,1	0,37	100
7	7,0	0,220	0,09	22,3	29,2	92,4	9,74	0,23	170
8	7,5	0,210	0,07	25,3	19,9	74,8	10,3	0,16	220
9	6,0	0,327	0,05	21,1	13,6	71,0	8,50	0,11	120
10	8,0	0,205	0,10	5,60	36,8	116	11,4	0,42	290
11	3,0	0,112	0,06	4,10	11,5	58,6	9,72	0,49	200
12	4,0	0,096	0,12	34,1	46,2	130	13,8	0,73	310
14	2,5	0,303	0,11	24,7	66,8	115	9,30	1,23	480
17	18,0	0,264	0,18	91,6	58,0	153	14,3	0,89	480
18	22,0	0,086	0,12	50,3	24,8	83,2	13,7	0,53	230
19	22,0	0,330	0,15	63,1	53,8	166	18,0	0,54	440
20	25,0	0,198	0,11	43,9	52,2	149	14,5	0,33	480
21	12,0	0,194	0,12	48,1	55,1	149	17,8	0,68	380
22	13,0	0,223	0,12	45,6	49,1	125	19,5	0,70	360
Среднее значение		0,20	0,10	33,6	33,8	98,8	11,5	0,41	280
Диапазоны классов качества		А-II	А	А-II	А-II	А-II	А-IV	А-I	І-II
Средний класс качества		І	А	II	І	II	IV	А	II

Грунты дноуглубления баровой части ГСХ складировались в подводный отвал, который представляет собой круг с координатами центра 45°19'13" N, 29°51'58" E и со следующими параметрами (рис. 2.11):

радиус отвала – 926 м;

площадь отвала – 2692475 м<sup>2</sup>.

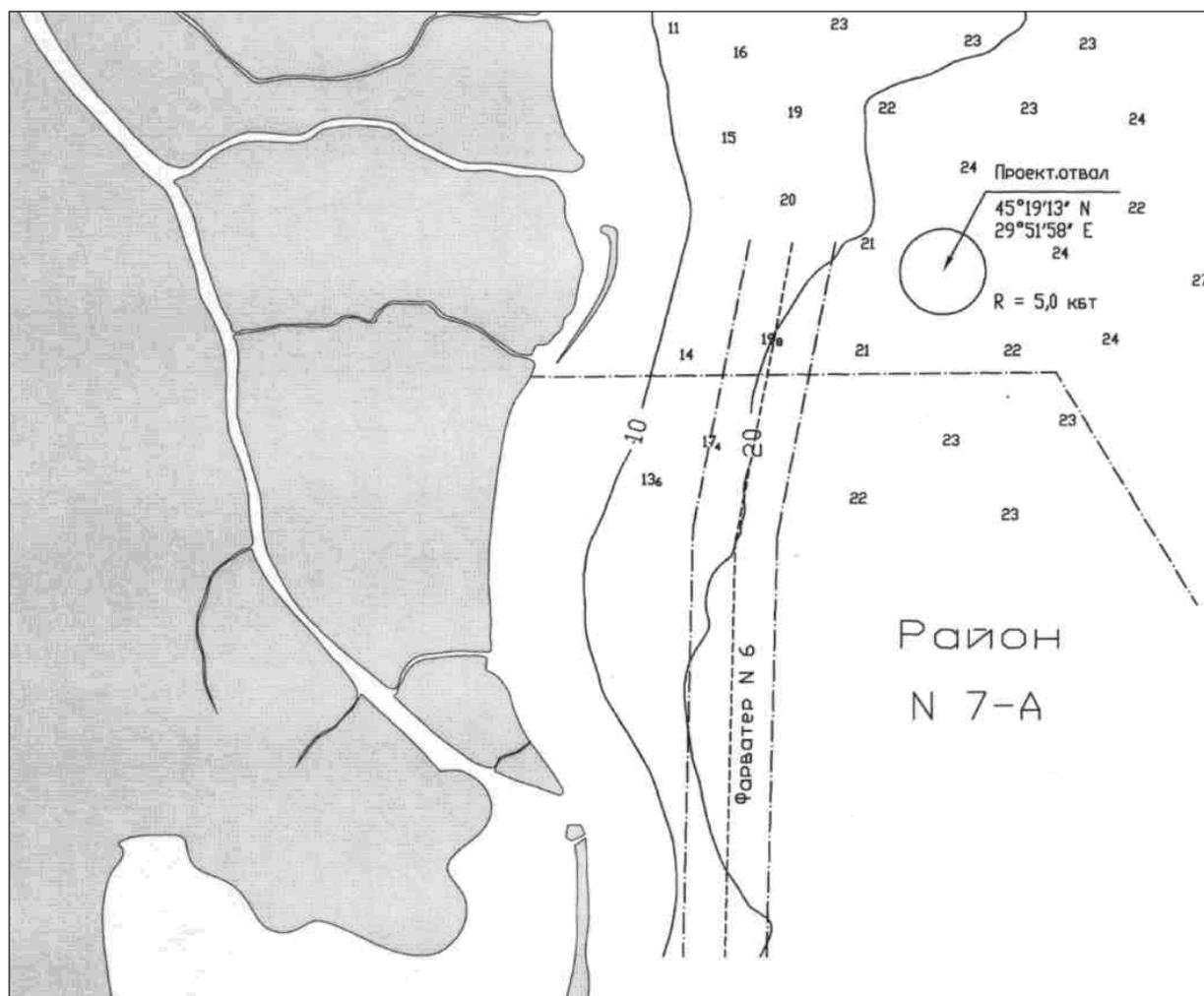


Рис. 2.11. Схема расположения подводного отвала грунтов дноуглубления ГСХ [127].

Пространственное распределение некоторых гидрофизических и гидрохимических показателей района складирования грунтов представлено в табл. 2.10.

Таблица 2.10

**Пространственное распределение некоторых гидрофизических и гидрохимических показателей района складирования грунтов [132]**

Горизонт, м	Т, °С	S, ‰	рН, ед.	ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	O <sub>2</sub>		Прозрачность, м
					мг/дм <sup>3</sup>	% нас.	
0	18,9	13,10	8,98	1,12	8,30	96,80	2,8
22,4	17,1	16,70	8,43	3,26	5,80	66,65	

Гидробиологическая характеристика акватории отвала приведена в табл. 2.11-2.13.

Таблица 2.11

**Численность и биомасса фитопланктона района складирования грунтов [132, 133]**

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, млн. кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, мг/м <sup>3</sup>
1	2003	673,1	1751,5
2	2003	4738,2	27128,4
<b>3</b>	<b>2003</b>	<b>2373,7</b>	<b>15770,9</b>

Таблица 2.12

**Состав, численность и биомасса зоопланктона района складирования грунтов [132, 133]**

Таксоны	Численность, экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, мг/м <sup>3</sup>
<i>Protozoa</i>	39	3,272
<i>Rotatoria</i>	7943	18,162
<i>Cladocera</i>	622	20,626
<i>Copepoda</i>	26702	112,703
<i>Chaetognatha</i>	44	198,841
<i>Appendicularia</i>	1328	7,970
Меропланктон	25441	60,505
<i>Varia</i>	4	0,289
Всего	62573	422,368

Таблица 2.13

**Количественные показатели макрозообентоса района складирования грунтов [133]**

№ станции	Глубина, м	Характер донных отложений	Количество таксонов	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
1	20,7	Песок с ракушей	7	2400	543,04
2	21,9	Ил темно-серый	7	1640	70,80
<b>3</b>	22,4	Ил серый рыхлый	4	<b>1480</b>	<b>93,72</b>

Следует отметить, что акватория участка № 3, на которой расположен действующий отвал грунтов, характеризуется наиболее низкими количественными показателями развития донных сообществ.

Гранулометрический состав грунтов района, отведенного для подводного отвала, приведен в табл. 2.14.

Таблица 2.14

**Средние значения физико-механических свойств грунтов [132]**

Содержание фракций грунта, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,10-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01- 0,005 мм	менее 0,005 мм	
0,7	0,7	6,6	7,1	21,6	20,5	36,4	1,58

Грунты рассматриваемой устьевой области Дуная загрязнены различными соединениями, включая НП и ТМ. Уровень загрязнения этими веществами в районе работ на современном этапе характеризует табл. 2.15.

Таблица 2.15

**Значения концентраций ЗВ в грунтах дноуглубления,  
предлагаемых к складированию [132, 133]**

ЗВ	НП	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn
Средняя концентрация, мг/кг	258	0,215	0,34	39,2	47,7	127
Класс загрязнения	II	II	A	II	I	II

Как следует из табл. 2.15, по большинству показателей грунты района отвала относятся ко II классу по степени загрязненности и могут быть складированы на морском подводном отвале с выплатой соответствующих компенсационных платежей. Объем капитальных вложений, необходимых для компенсации ущерба, наносимого складированием 2331 тыс. м<sup>3</sup> грунта, составит 633,8 тыс. грн.

Следует отметить, что подводный отвал находится в зоне пониженной динамической активности придонных вод, что способствует скорейшей стабилизации сброшенного грунта и предотвращению его повторного взмучивания.

**Белгород-Днестровский порт.** В Белгород-Днестровский порт суда проходят по МПК длиной около 2,6 км и далее по Днестровско-Лиманскому каналу длиной 17,1 км, шириной 60 м и глубиной 5,5-6,0 м.

В 2013 году объем разработанных грунтов на Лиманском подходном канале составил 119935 м<sup>3</sup>. Работы велись стационарным землесосом ДН-5 ГП «Укрводпуть». Изъятый грунт сбрасывался на подводный отвал № 904 при выполнении ремонтного черпания с 01.11 по 14.11.2013 года и на подводный отвал № 902 (с 15.11 по 05.12.2013 года) (рис. 2.6).

Гидрологический режим района проведения дноуглубительных работ характеризуется наличием постоянно действующего стокового течения, скорости которого составляют 1-6 см/с, а в районе пролива могут достигать 19-25 см/с, в отдельных случаях – 1,0-1,5 м/с. Кроме стоковых течений, наблюдаются также ветровые и компенсационные. Суммарная скорость стоковых и устойчивых ветровых течений при сгонных ветрах увеличивается с северо-запада на юго-восток от 0,1 до 0,8 м/с. При нагонах результирующая скорость в 1,2-1,7 раз меньше.

При наиболее вероятных ветрах в Днестровском лимане создаются зоны транзитного переноса воды и две циркуляционные зоны. Первая занимает левобережную часть центрального и весь южный район лимана. Водная масса поверхностного слоя перемещается со скоростью от 5 до 9 см/с. Правобережная часть северного и центрального районов лимана занята двумя циркуляционными вихрями. У берега прослеживается антициклоническая циркуляция. Наибольшие значения средних по вертикали скоростей течений достигают 6 см/с. Максимальные (11-15 см/с) отмечаются на поверхности. Среднюю часть северной половины лимана занимает циклонический вихрь. Максимальные скорости течения – 4-6 см/с.

Краткая характеристика метеорологических условий района проведения дноуглубительных работ представлена в табл. 2.16.

Таблица 2.16

**Метеорологические условия [134]**

<b>Ветер</b>	
Среднегодовая скорость ветра	4,9-5,7 м/с
Направления ветра, способствующие наибольшей скорости ветра	В, СВ
Вероятность ветра со скоростью 1-5 м/с и штилей	45-65 %
Число дней с сильным ветром	60
Скорость ветра, повторяемость превышения которой составляет 5 %	9,5 м/с
<b>Температура воздуха</b>	
Среднегодовая температура воздуха, °С	9,5-10,5
максимальная (месяц)	20,9 (июль)
минимальная (месяц)	-2,5 (январь)
абсолютный максимум	28-36
абсолютный минимум	-23 – -25
<b>Осадки</b>	
Среднегодовое количество осадков, мм	375-400
<b>Туманы</b>	
Среднегодовое количество дней с туманом	50

Специализированные научно-исследовательские работы в Днестровском лимане 2013 года показали, что основные гидрохимические параметры среды находятся на уровне средне многолетних (табл. 2.17).

Таблица 2.17

**Динамика основных гидрофизических и гидрохимических параметров  
водной среды в районе проведения работ в ноябре 2013 года [134]**

Участок	№ ст.	O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	pH, ед.	Прозрач- ность, м	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	S, ‰
ПК 3000	1	6,8	8,1	0,6	0,16	0,13	0,26	0,32	1,5
	№ 904	6,9	8,0	0,5	0,13	0,14	0,28	0,33	2,2
ПК 9000	1	6,6	8,2	0,7	0,15	0,10	0,30	0,36	1,4
	№ 902	6,4	8,1	0,7	0,13	0,11	0,28	0,34	2,1

Результаты наблюдения 2013 г. за основными абиотическими и биотическими показателями района исследования представлены в табл. 2.18-2.20.

Таблица 2.18

**Гидробиологические параметры района складирования грунтов [134]**

Район взятия пробы	Фитопланктон		Зоопланктон		Зообентос	
	Численность, млн.кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	Численность, тыс.экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	Числен- ность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
ПК 3000	5,6	2,48	19,0	0,87	291	15,7
№ 904	5,3	1,27	11,1	0,61	169	4,8
ПК 9000	10,1	2,09	20,2	1,00	187	6,3
№ 902	8,8	1,16	18,1	1,01	202	14,1
Р-н работ	9,88	1,83	17,7	0,85	301	13,3

Таблица 2.19

**Физико-механические свойства грунтов дноуглубления  
на участках ремонтного черпания порта Белгород-Днестровский [134]**

Участок	Содержание фракций, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5- 0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05- 0,01 мм	0,01- 0,005 мм	менее 0,005 мм	
ПК 3000	1	2	6	22	27	22	19	1,40
ПК 9000	-	1	2	25	28	23	21	1,38
Сред.	0,5	1,5	4,0	23,5	27,5	22,5	20,0	1,39

Таблица 2.20

**Средние значения концентраций ЗВ в грунтах дноуглубления [134]**

Показатели	Лиманский канал, мг/кг		Класс
	ПК 3000	ПК 9000	
Ртуть	0,175	0,167	I
Кадмий	0,99	0,88	I
Свинец	38,2	33,8	II
Цинк	102	79	I-II
Медь	34,8	30,2	I
Мышьяк	5,4	5,3	I
НП	189	165	I-II
Фенолы	1,42	1,39	I
Фтор общий	298	293	A
Фосфор общий	426	420	A

По степени загрязненности изымаемый грунт относится ко II классу и может быть складирован в подводный отвал с выплатой соответствующих компенсаций за ущерб, нанесенный водной среде и биоресурсам Днестровского лимана. Величина ущерба за сброс 119,935 тыс. м<sup>3</sup> грунта составит 281 тыс. грн.

**Ильичевский морской торговый порт (ИМТП).** ИМТП находится на берегах Сухого лимана в 12 милях к юго-западу от Одессы. С морем соединен подходным каналом длиной около 1,5 км, шириной 160 м и глубинами 16 м. Возле входа канала в море выдвинуты два ограждающих мола (шпоры) – Северный и Южный. Первоначально, при строительстве, причалы морского порта рассчитывались на прием судов с осадкой до 11 м. Постепенно возникла необходимость в обеспечении больших глубин и доведении их до 10-16 м.

Объемы разработанного и складированного грунта ИМТП в 2009-2010 гг. представлены в табл. 2.21.

Таблица 2.21

**Объемы дноуглубительных работ на акватории ИМТП  
в 2009 – 2010 гг. [128]**

Год производства дноуглубит. работ	Объем разработки, тыс. м <sup>3</sup>	Вид дноуглубительных работ	Участок разработки
2009	274,125	Капитальное дноуглубление	Причал № 1
2010	42,752	Капитальное дноуглубление	Причал № 1

Гранулометрический состав и результаты химического анализа проб морских донных отложений с акватории ИМТП приведены в табл. 2.22-2.23.

Таблица 2.22

**Гранулометрический состав и плотность донных отложений акватории  
ИМТП [128]**

Грунт	Содержание фракций, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	менее 0,005 мм	
Ил глинистый с включениями ракуши	2	2	11,5	22,5	23,5	18,5	20	1,42
Песок с включениями ракуши	1	2	22	32	24	10	9	1,69

**Средние значения концентраций ЗВ в грунтах дноуглубления [128]**

Показатели	Концентрации, мг/кг	Класс
Ртуть	0,085	А
Кадмий	1,47	І
Свинец	16,5	І
Цинк	72,2	І
Медь	28,9	А
Мышьяк	4,83	А
НП	194	А
Фенолы	1,37	І
Фтор общий	120	А
Фосфор общий	460	А

Согласно классификации по степени загрязненности разрабатываемые грунты относятся к А-І классу, т. е. они могут быть складированы в подводный отвал при условии выплаты компенсационных платежей за загрязнение морской среды. Величина предварительно рассчитанных компенсационных платежей при складировании грунта дноуглубления на подводном отвале, расположенном к востоку от ИМТП, составляет 1,14 млн. грн. за сброс 4,75 млн. м<sup>3</sup> грунта.

В период 2009-2010 гг. грунт складировался в подводные отвалы ИМТП (табл. 2.24, рис. 2.12).

Таблица 2.24

**Характеристика отвалов грунта ИМТП [128]**

Расположение места действующего отвала	К востоку от ИМТП	К югу от ИМТП
Координаты центра отвала (конфигурация)	46°19' 28" N 30°46' 48" E (окружность диаметром 1100 м)	четыреугольник с координатами вершин: 46°12' 30" N 30°48' 30" E 46°12' 30" N 30°49' 30" E 46°11' 30" N 30°49' 30" E 46°11' 30" N 30°48' 30" E
Площадь отвала, км <sup>2</sup>	0,95	2,4
Грунтовместимость, млн. м <sup>3</sup>	4,75	3,0
Средняя глубина, м	23,3	27,5

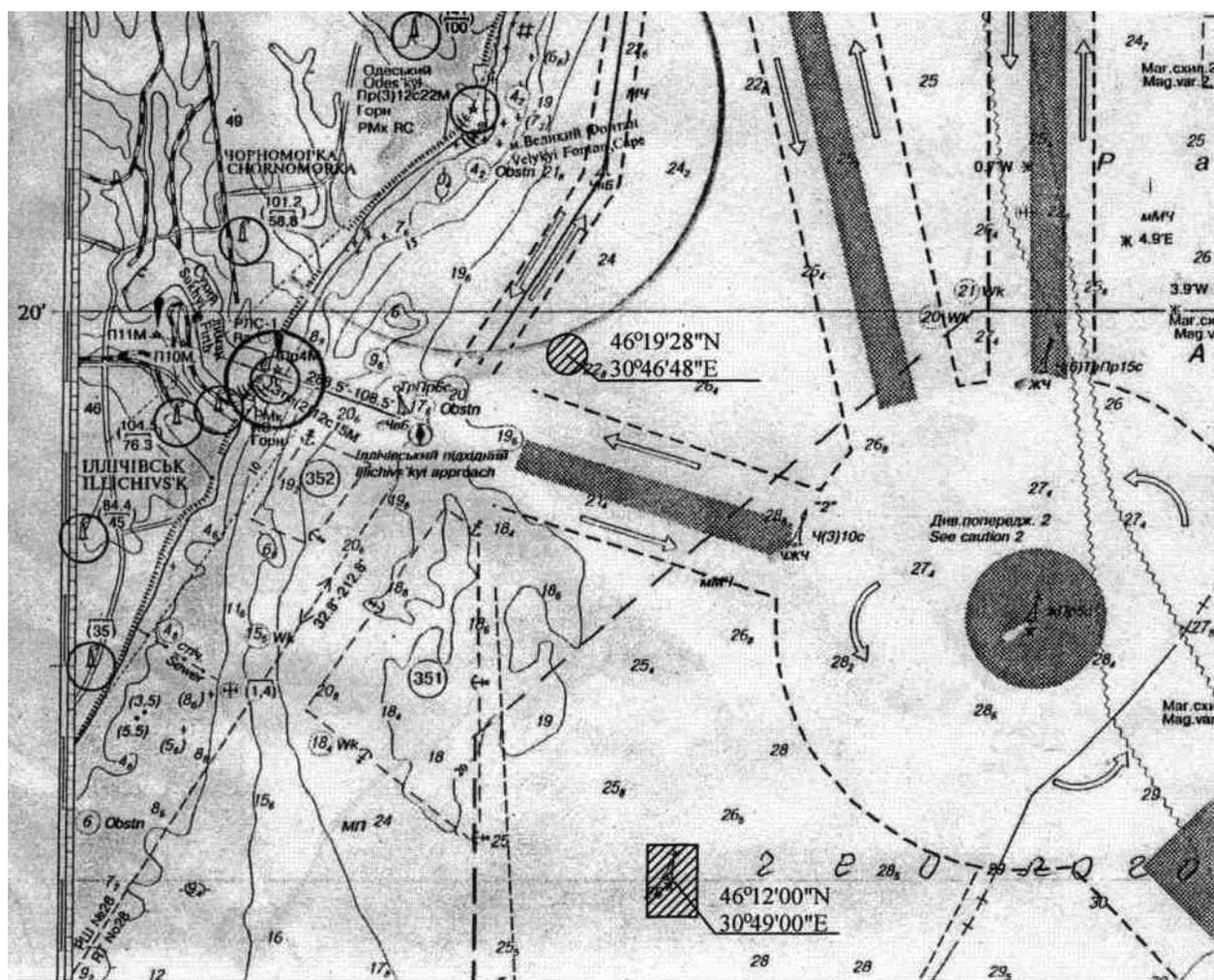


Рис. 2.12. Схема расположения подводных отвалов грунтов дноуглубления акватории ИМТП [128].

Морской отвал в виде окружности (рис. 2.12) был запроектирован в 2010 г. в ходе выполнения дноуглубительных работ на акватории ИМТП, в том числе при проведении реконструкций: судоходного канала с доведением глубин до 17,0 м; акваторий причалов №№ 7, 8, и 9 с доведением глубин до 16,0 м; акватории причала № 1 с доведением глубин до 15,0 м.

Метеорологические условия и гидрологический режим района подводного отвала представлены в табл. 2.25-2.26.

Результаты комплексных гидрохимических и гидробиологических исследований акватории отвала ИМТП и прилегающего участка СЗШЧМ представлены в табл. 2.27-2.28.

**Метеорологические условия [114, 135]**

<b>Ветер</b>	
Преобладающее направление ветров	СЗ – 22,33 %
Преобладающее сезонное направление ветров	
зима	СЗ – 22,31 %
весна	Ю – 21,58 %
лето	СЗ – 26,77 %
осень	СЗ – 23,61 %
Период наибольшей повторяемости ветров	
северных румбов	зима
южных румбов	весна
Преобладающее направление штормового ветра	С, СВ
Повторяемость штормовых ветров	
со скоростями более 10 м/с	10,69 %
более 15 м/с	0,57 %
Наибольшая скорость ветра, м/с	35-37
Наибольшая продолжительность штормов, часов	55-60
Расчетные скорости ветра, м/с	
2 %	27
4 %	26
<b>Температура воздуха</b>	
Среднегодовая температура воздуха, °С	10,3
максимальная (месяц)	37 (август)
минимальная (месяц)	-27 (февраль)
<b>Осадки</b>	
Количество осадков, мм	
среднегодовое	404
максимальное (месяц)	164
минимальное (месяц)	0
суточный максимум, мм/сутки	110
<b>Туманы</b>	
Количество дней с туманом	
среднегодовое	35
максимальное годовое	51

## Гидрологический режим [114, 135]

<b>Температура воды</b>				
Среднегодовая температура воды, °С	10,7			
максимальная (месяц)	27,0 (август)			
минимальная (месяц)	-2,0 (февраль)			
<b>Соленость воды</b>				
Среднегодовая соленость воды, ‰	14,62			
максимальная (месяц)	20,28 (март)			
минимальная (месяц)	5,14 (февраль)			
<b>Волновой режим</b>				
Длина разгона волн от волноопасных направлений, км	Ю – 570 ЮЮВ – 525			
Наиболее волноопасные направления	СВ, В, ЮВ			
Среднегодовая повторяемость волнения				
ветрового	90-95 %			
зыби	5-10 %			
Повторяемость волнения от наибольших волноопасных направлений				
СВ	16,01 %			
В	11,06 %			
ЮВ	12,68 %			
Максимальные параметры волн				
направление	СВ	В	ЮВ	
высота, м	2,4	2,3	1,8	
длина, м	72	72	48	
период, с	5-7	5	5	
Расчетные параметры волн	Повторяемость один раз в 20 лет			
направление	СВ	В	ЮВ	Ю
высота (1%), м	3,88	4,38	6,98	5,09
длина, м	48	54	90	75
период, с	5,6	5,9	8,0	6,9
<b>Течения</b>				
Условия формирования	сгонно-нагонное действие ветра			
Типы течений	вдольбереговые, циркуляционные			
Преобладающие типы течений	вдольбереговые			
Направление	по направлению ветра			
Максимальные придонные скорости, м/с	0,56-0,65, в единичных случаях 1,0			

Таблица 2.27

**Основные гидрохимические параметры водной среды в районе  
морского подводного отвала [114, 135]**

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Морской подводный отвал		
			1	2	3
1	рН	Единицы рН	8,0	8,0	8,0
2	O <sub>2</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	7,2	7,1	7,1
3	БПК <sub>5</sub>	мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4,1	4,2	4,2
4	Азот нитритный	мг/дм <sup>3</sup>	0,008	0,006	0,006
5	Азот аммиачный	мг/дм <sup>3</sup>	0,77	0,61	0,60
6	Азот нитратный	мг/дм <sup>3</sup>	2,98	2,32	2,42
7	Фосфор общий	мг/дм <sup>3</sup>	0,025	0,021	0,024
8	ВВ	мг/дм <sup>3</sup>	3,7	3,3	2,8
9	НП	мкг/дм <sup>3</sup>	0,04	-	0,03
10	Фенолы	мкг/дм <sup>3</sup>	1,1	-	0,9
11	Свинец	мкг/дм <sup>3</sup>	6,7	-	5,6
12	Кадмий	мкг/дм <sup>3</sup>	3,3	-	2,4
13	Медь	мкг/дм <sup>3</sup>	1,1	-	0,9
14	Цинк	мкг/дм <sup>3</sup>	4,9	-	6,0
15	Мышьяк	мкг/дм <sup>3</sup>	7,1	-	7,0
16	Ртуть	мкг/дм <sup>3</sup>	0,009	-	0,01

Таблица 2.28

**Динамика численности и биомассы гидробионтов  
на участке складирования грунтов [114, 135]**

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, млн. кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
Фитопланктон			
СЗШЧМ	2007	765	1,79
СЗШЧМ	2008	806	1,83
СЗШЧМ	2009	784	1,81
<b>1</b>	<b>2009</b>	<b>520</b>	<b>1,08</b>
2	2009	598	1,27
3	2009	570	1,12

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, тыс. экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
Зоопланктон			
СЗШЧМ	2007	6,7	0,084
СЗШЧМ	2008	7,9	0,101
СЗШЧМ	2009	5,8	0,081
<b>1</b>	<b>2009</b>	<b>7,4</b>	<b>0,050</b>
2	2009	7,8	0,060
3	2009	7,4	0,062
Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
Зообентос			
СЗШЧМ	2007	116	29,7
СЗШЧМ	2008	189	32,6
СЗШЧМ	2009	74	19,8
<b>1</b>	<b>2009</b>	<b>47</b>	<b>8,7</b>
2	2009	61	12,8
3	2009	81	22,9
4	2009	74	17,3
5	2009	68	14,6

Как показывают данные табл. 2.27, основные гидролого-гидрохимические параметры в районе складирования грунтов по наблюдениям 2009 года соответствуют таковым в СЗШЧМ.

По результатам анализа гидробиологических параметров, сравнивая динамику численности и биомассы кормовых организмов со среднемноголетними значениями, можно констатировать, что основные количественные показатели гидробиологического сообщества изменяются незначительно. Также следует отметить, что акватория участка №1, на которой расположен действующий отвал грунтов, характеризуется наиболее низкими количественными показателями развития донных сообществ.

На основании выполненных аналитических исследований донных отложений акватории ИМТП и участка рассматриваемого отвала произведен сопоставительный анализ их состава и качества (табл. 2.29-2.30).

Таблица 2.29

**Средние значения регламентирующих химических показателей [114]**

Участок опробования	Концентрация, мг/кг										Класс
	НП	Фенолы	F	P	As	Hg	Kd	Pb	Cu	Zn	
Акватория ИМТП	190,0	1,37	81,1	465,7	4,7	0,08	1,4	15,9	28,9	75,9	А-II
Отвал	188,0	0,42	62,7	231,0	5,4	0,074	0,1	14,7	37,5	75,0	А-I

Таблица 2.30

**Средние значения физико-механических показателей грунтов  
складирования [114]**

Показатели	Гранулометрический состав, %			
	Складированные грунты			Донные отложения отвала
Размер фракций, мм	Ил	Песок	Суглинок	Ил
1 – 0,5	1,0	1,5	0,0	0,9
0,5 – 0,25	2,0	3,5	3,0	2,1
0,25 – 0,10	12,0	21,0	16,0	6,7
0,10 – 0,05	23,0	28,5	20,0	21,3
0,05 – 0,01	23,0	24,5	25,0	30,4
0,01 – 0,005	20,0	11,0	20,0	18,3
менее 0,005	19,0	10,0	16,0	20,3
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,46	1,67	1,89	1,42

Комплексная оценка значений показателей физических и химических свойств позволяет определить донные отложения, разрабатываемые при дноуглублении акватории ИМТП, как весьма схожие с донными отложениями участка отвала.

**Одесский морской торговый порт (ОМТП).** ОМТП расположен у юго-западного берега Одесского залива в Северо-Западной части Черного моря. Порт имеет два подходных канала. Первый подходной канал сооружен в 1931 г. Трасса канала проходит через Западный вход к Практической, Хлебной гаваням и Нефтегавани. Канал состоит из двух колен с углом соединения 127° и

эксплуатируется в следующих габаритах: длина – 4,0 км, глубина – 14,0 м, ширина – 100 - 240 м (первое колено) и 200 - 250 м (второе колено).

Второй подходной канал сооружен для подхода танкеров к причалам Нефтегавани. В 1991 г. глубина составляла 9,3 м, ширина – 100 м, длина – 1750 м. В 1994 г. глубина была увеличена до 10 м. На сегодняшний день, в связи со значительными убытками для поддержания навигационных глубин, эксплуатацию второго подходного канала остановлено.

Объемы разработанного и складированного грунта ОМТП в 2005-2010 гг. представлены в Приложении В.

Объем выполненных дноуглубительных работ при подчистке акватории причалов ОМТП в период первого и четвертого кварталов 2008 года составил 128071 м<sup>3</sup> и 10358 м<sup>3</sup> соответственно [136, 137].

Разработке и дампингу подлежали глинистые и суглинистые илы слаботекучей и текучей консистенции с линзами и прослоями ила супесчаного. Гранулометрический состав и результаты химического анализа проб морских донных отложений с акватории ОМТП приведены в табл. 2.31-2.32.

В соответствии с классификацией [87] грунты дноуглубления относятся ко II группе по трудности разработки, гранулометрический класс (IV-VI) – илистый грунт с примесью битой ракуши.

Таблица 2.31

**Гранулометрический состав донных отложений [136, 137]**

Номер пробы	Содержание фракций, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	менее 0,005 мм	
1	0,5	0,7	2,9	15,7	50,1	14,1	16,0	1,51
2	1,5	2,9	4,9	12,8	47,2	13,9	16,8	1,49
Среднее	1,0	1,8	3,9	14,3	48,6	14,0	16,4	1,50
8	0,5	0,7	2,9	15,7	53,1	11,1	16,0	1,47
9	2,5	2,9	4,9	11,8	47,0	14,0	16,9	1,45
Среднее	1,5	1,9	3,9	13,7	50,0	12,5	16,5	1,46

**Средние значения концентраций химических веществ в грунтах  
дноуглубления [136, 137]**

Показатели	Концентрации, мг/кг	Класс	Концентрации, мг/кг	Класс
	I квартал		IV квартал	
Ртуть	0,220	I	0,144	I
Кадмий	2,6	I	2,2	II
Свинец	36,8	II	36,45	II
Цинк	120	II	79	II
Медь	85,1	II	34,55	II
Мышьяк	6,45	II	5,15	II
НП	429	III	234	II
Фенолы	1,57	II	1,27	I
Фтор общий	58,5	A	175,2	A
Фосфор общий	430	A	442,5	A

Согласно классификации по степени загрязненности разработанные грунты относятся ко II классу, за исключением НП – III класс (первый квартал). Соответственно, грунты могут складироваться в подводный отвал с выплатой соответствующих компенсационных платежей за ущерб, нанесенный водной среде и рыбному хозяйству.

В период первого и четвертого кварталов 2008 года грунт складировался в подводный отвал IV ОМТП (табл. 2.33, рис. 2.13).

Таблица 2.33

**Характеристика отвала грунта ОМТП [130]**

Расположение места отвала	На расстоянии 22 км от входа в ОМТП	
Граница отвала	46°24'08" N	31°00'30" E
	46°24'08" N	30°59'30" E
	46°23'08" N	30°59'30" E
	46°23'08" N	31°00'30" E
Емкость отвала, млн. м <sup>3</sup>	3	
Глубина на месте отвала: пределы изменения, м средняя, м	24-26	
	25,2	

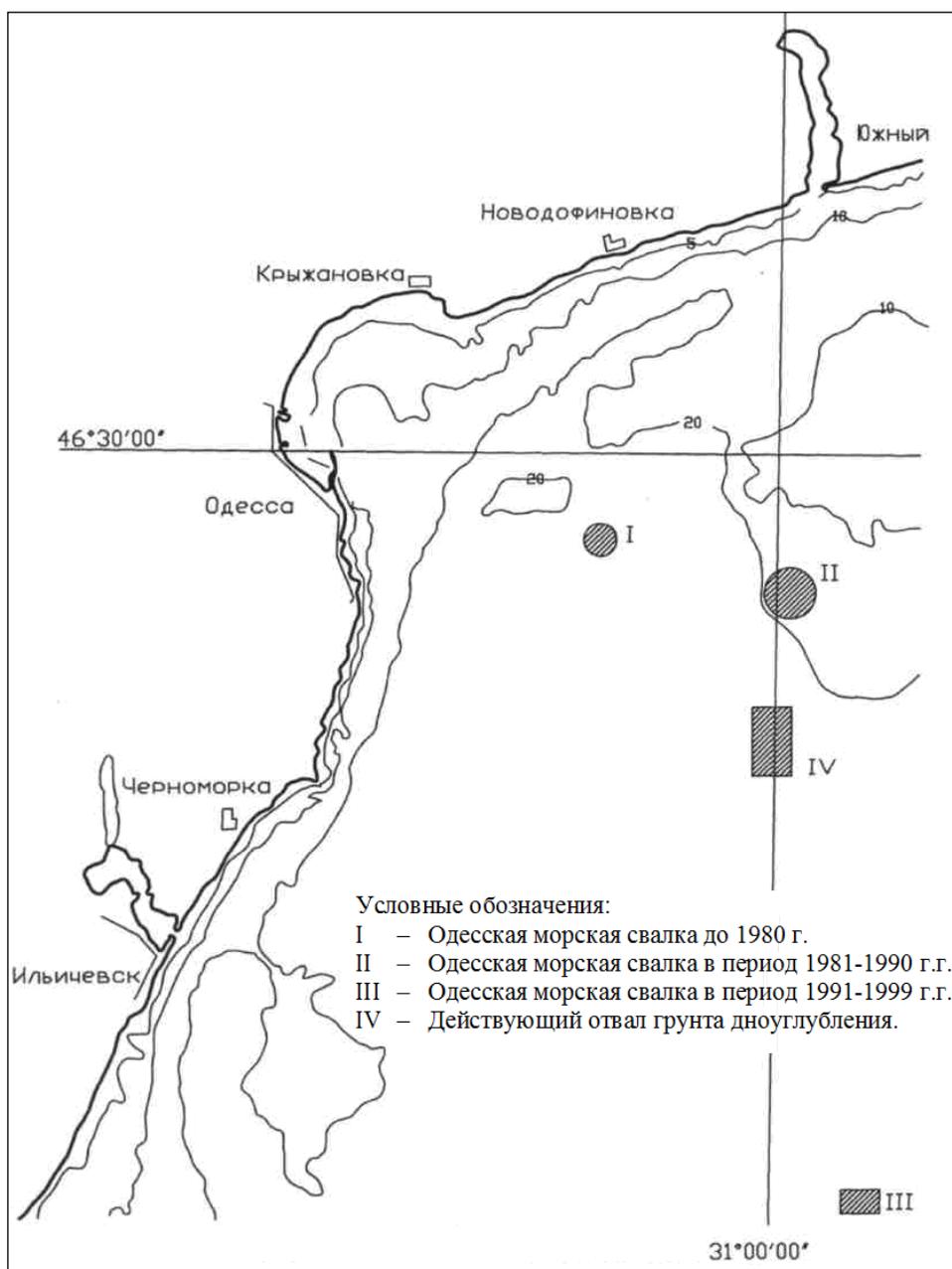


Рис. 2.13. Схема расположения подводных отвалов грунтов ОМТП [130].

Для обеспечения утилизации необходимого объема грунтов дноуглубления на акватории СЗШЧМ в 2011 г. был определен новый морской отвал ОМТП, представляющий четырехугольник со сторонами 1850x1300 м (рис. 2.14). Координаты вершин представлены в табл. 2.34. Для эффективного и равномерного заполнения отвал разделен на шесть загрузочных блоков. Общая грунтовместимость морского отвала составляет 8,16 млн. м<sup>3</sup>. Отвал действует и сегодня.

## Координаты морского подводного отвала ОМТП [116]

№ вершины	Широта	Долгота
1	46°21'40"	30°49'00"
2	46°21'40"	30°50'00"
3	46°20'40"	30°50'00"
4	46°20'40"	30°49'00"

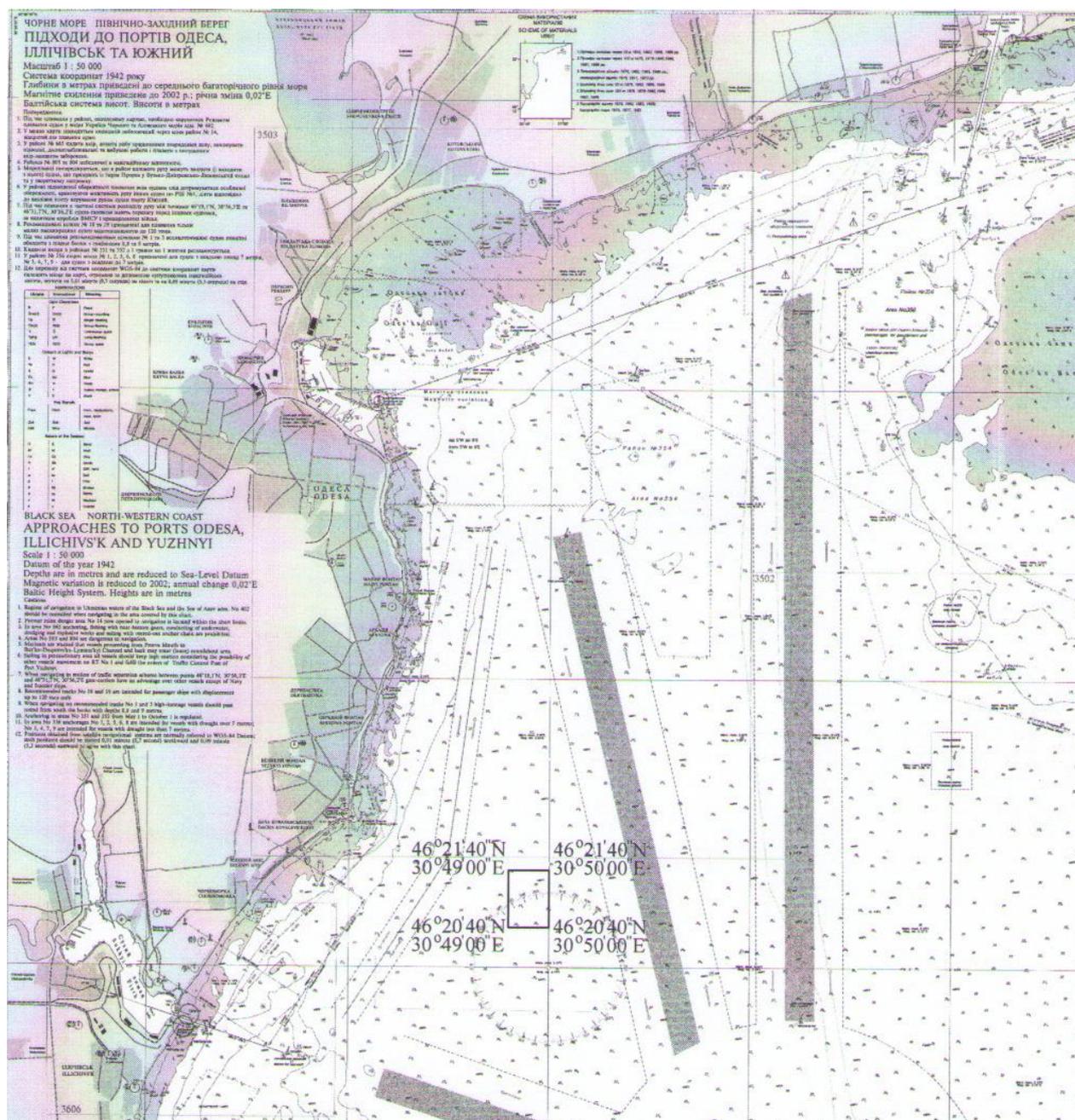


Рис. 2.14. Схема расположения подводного отвала грунта ОМТП, проект 2011 г. [116].

Метеорологические условия и гидрологический режим района подводного отвала представлены в табл. 2.35-2.36.

Таблица 2.35

### Метеорологические условия [116, 138]

<b>Ветер</b>	
Преобладающее направление ветров	СЗ – 22 %, С, СВ, Ю, ЮВ – 11-15 %
Волноопасные направления ветра	В, ЮВ, Ю, СВ
Преобладающее сезонное направление ветров зима весна лето осень	СВ, СЗ – 15-21 % ЮВ, СЗ – 19-20 % СЗ – 28 %, ЮВ – 16 % СЗ – 21 %, СВ, Ю, ЮВ – 12-13 %
Период наибольшей повторяемости ветров восточных румбов северных румбов южных румбов	весна (38 %) зима (49 %) лето, осень (45 %)
Повторяемость штормовых ветров, % со скоростями более 10 м/с более 15 м/с	14,65 0,65
Повторяемость штормовых ветров, % зима весна, осень лето	20,2 13,1-15,5 8
Повторяемость штормовых ветров волноопасных направлений, % со скоростями более 10 м/с более 15 м/с	8,06 0,26
Повторяемость штормовых ветров волноопасных направлений, % зима весна, осень лето	11,4 7,3-8,3 2,5
Повторяемость штормовых восточных ветров в наиболее опасный сезон, % со скоростями более 10 м/с более 15 м/с	2,74 (зима) 0,11-0,13 (зима, весна)
Число дней со штормовым ветром (более 15 м/с) среднегодовое	38
Наибольшая скорость ветра, м/с (направление)	30 (С, СЗ), 28 (В, З)
Наибольший штормовой период	декабрь-февраль

<b>Температура воздуха</b>	
Среднегодовая температура воздуха, °С	10,3
максимальная (месяц)	37,3 (август)
минимальная (месяц)	-10 (февраль)
абсолютный максимум	39,1
абсолютный минимум	-29,7
<b>Осадки</b>	
Количество осадков, мм	
среднегодовое	367
максимальное (месяц)	43 (июнь)
минимальное (месяц)	0
суточный максимум (месяц), мм/сутки	67 (август)
<b>Туманы</b>	
Количество дней с туманом	
среднегодовое	39
максимальное годовое	51
максимальное месячное	7 (декабрь)

Таблица 2.36

**Гидрологический режим [116, 138]**

<b>Температура воды</b>	
Среднегодовая температура воды, °С	11,1
максимальная (месяц)	28,6 (июль)
минимальная (месяц)	-1,3 (февраль)
<b>Соленость воды</b>	
Среднегодовая соленость воды, ‰	14,4
максимальная (месяц)	20,6 (март)
минимальная (месяц)	1,3 (май)
<b>Волновой режим</b>	
Вид волнения, повторяемость, %	
ветрового	91
зыби	9
Максимальная повторяемость волнения, %	
СЗ	20,39
ЮВ	17,57
Ю	14,46
Максимальная повторяемость волн высотой более 1,5 м, %	
СВ	0,55
В	0,40
ЮВ	0,26

<b>Волновой режим</b>			
Максимальные параметры волн			
высота, м		3,5	
длина, м		75	
период, с		12,5	
Повторяемость высот волн, %			
менее 0,5		67,54	
0,6-1,0		25,60	
1,0-1,5		5,24	
более 1,5		1,62	
Расчетные параметры волн		Повторяемость один раз в 25 лет	
		СВ	В
высота волны 1 % обеспеченности, м		2,6	3,26
высота волны 5 % обеспеченности, м		2,06	2,61
средняя длина волны, м		25	38
<b>Сгонно-нагонные явления</b>			
Величины колебаний сгонно-нагонных явлений, см			
средние		30-40	
максимальные		более 50	
Отметки критических и опасных уровней, см			
явления сгонов: критический		366	
опасный		346	
особенно опасный		295	
явления нагонов: критический		446	
<b>Течения</b>			
Вид течений	Условия формирования	Направление течения	Максимальная скорость, м/с
Ветровое	Штормовые ветры морских румбов	Поверхностное течение может отклоняться по направлению ветра до 40-50°	0,50-0,75
Сточное	Сток Днепро-Бугских вод	Южное	0,10-0,20
Компенсационное	Ветры восточных румбов	Восточное (действует в придонном слое)	0,1
Штормовое вдольбереговое	Сильные и длительные ветры восточных румбов	Южное	до 1,0
Инерционное	Окончание действия штормовых ветров	Совпадает по направлению с ветровыми течениями	0,15
Сейшевое	Окончание действия штормовых ветров (через 1-1,5 суток)	Периодически меняется	0,05

Комплекс гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследований на участке складирования грунтов включал в себя анализ и обобщение архивных и фондовых источников, а также наблюдений 2011 года на 3-х станциях (табл. 2.37-2.40).

Таблица 2.37

**Основные гидрофизические и гидрохимические параметры водной среды  
на участке складирования грунтов [116, 138]**

№	Показатель	Единицы измерения	Морской подводный отвал		
			1	2	3
1	Температура воды	°С	14,9	15,1	15,0
2	рН	Единицы рН	8,0	8,0	8,1
3	Соленость	‰	15,0	14,9	14,9
4	O <sub>2</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	6,9	7,0	6,9
5	БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4,0	3,9	3,9
6	Азот нитритный	мг/дм <sup>3</sup>	0,007	0,006	0,007
7	Азот аммиачный	мг/дм <sup>3</sup>	0,8	0,7	0,8
8	Азот нитратный	мг/дм <sup>3</sup>	2,9	2,9	2,8
9	Фосфор общий	мг/дм <sup>3</sup>	0,03	0,03	0,03
10	ВВ	мг/дм <sup>3</sup>	2,7	2,5	2,5

Как показывают данные табл. 2.37, основные гидролого-гидрохимические параметры в районе складирования грунтов по наблюдениям 2011 года соответствуют таковым в СЗШЧМ.

Наблюдения на 3-х станциях района дампинга показали, что в качественном составе фитопланктона по числу видов доминировал диатомово-перидиниевый комплекс: диатомовых – 56 %; перидиниевых – 14 %; сине-зеленых – 17 %, зеленых – 6 % от общего числа видов. Диатомовые водоросли представлены комплексом видов, основу которого составляют виды родов *Skeletonema*, *Cyclotella*, *Cylindrotheca*. Перидиниевые водоросли представлены родами *Gymnodinium*, *Prorocentrum*.

Количественные характеристики фитопланктонного и зоопланктонного сообществ представлены в табл. 2.38-2.39.

Таблица 2.38

**Динамика численности и биомассы фитопланктона на участке  
складирования грунтов [116, 138]**

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, млн. кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
СЗШЧМ	2007	765	1,79
СЗШЧМ	2008	806	1,83
СЗШЧМ	2009	784	1,81
<b>1</b>	<b>2011</b>	<b>698</b>	<b>1,67</b>
2	2011	709	1,72
3	2011	732	1,81

Таблица 2.39

**Динамика численности и биомассы зоопланктона на участке  
складирования грунтов [116, 138]**

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, тыс. экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
СЗШЧМ	2007	6,7	0,084
СЗШЧМ	2008	7,9	0,101
СЗШЧМ	2009	5,8	0,081
СЗШЧМ	2010	6,6	0,079
<b>1</b>	<b>2011</b>	<b>7,4</b>	<b>0,075</b>
2	2011	7,8	0,080
3	2011	7,4	0,076

Таблица 2.40

**Динамика численности и биомассы зообентоса  
на участке складирования грунтов [116, 138]**

Район наблюдений	Период наблюдений	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
СЗШЧМ	2007	116	29,7
СЗШЧМ	2008	189	32,6
СЗШЧМ	2009	74	19,8
СЗШЧМ	2010	81	22,9
<b>Уч. №1</b>	<b>2011</b>	<b>104</b>	<b>17,1</b>
Уч. №2	2011	128	18,6
Уч. №3	2011	127	18,7

Исследования 2011 г. показали наличие в зоопланктонном сообществе 28 таксонов. Более 35 % от общего числа таксонов составляют представители пресноводного и солоноватоводного комплексов. Остальные – морские. Основу структуры составляют коловратки (18 %), ветвистоусые (18 %) и веслоногие ракообразные (20 %). Среднеголетняя численность – 38133 экз./м<sup>3</sup>, а биомасса – 1330,99 мг/м<sup>3</sup>.

По результатам контрольных апробирований (табл. 2.40) можно констатировать, что бентосные сообщества находятся в достаточно благополучном состоянии и характеризуются наличием моллюсков, в основном двухстворчатых (мидия, мия, хамелея, кардиум). Значительна роль червей, в основном полихет и немертин. С 19 до 26 м в распределении донной фауны отмечены определенные изменения. Если на глубинах около 20 м биомасса достигает 15-25 г/м<sup>2</sup>, то на 22-23 м эта величина обычно не превышает 10-16 г/м<sup>2</sup>. На глубинах 24 м и более отмечены участки черного ила, где донные сообщества значительно обеднены и биомасса не превышает 10 г/м<sup>2</sup>. В целом район дампинга грунтов по данным 2011 г. характеризуется невысокими количественными показателями.

Гидробиологические исследования доказывают целесообразность выбора для новой свалки акватории участка №1, характеризующейся наиболее низкими количественными показателями развития донных сообществ. Объем капитальных вложений, необходимых для компенсации ущерба, наносимого водной среде и биоресурсам складированием 8,16 млн. м<sup>3</sup> грунта на данном участке, составит 5,66 млн. грн.

На основании выполненных аналитических исследований донных отложений акватории ОМТП и участка проектируемого отвала произведен сопоставительный анализ их состава и качества. Сравнение средних значений химических (табл. 2.41) и физико-механических показателей (табл. 2.42) позволяет сделать следующие выводы: физические показатели (плотность и взвесеобразующая фракция) практически не отличаются; концентрации ЗВ отличаются незначительно.

Таблица 2.41

**Средние значения физико-механических показателей грунтов  
складирования [116, 138]**

Показатели	Гранулометрический состав, %			
	Складированные грунты			Донные отложения отвала
Размер фракций, мм	Ил	Заиленный песок	Суглинок и глина	Ил
1 – 0,5	0,2	3,0	0,2	0,9
0,5 – 0,25	0,2	8,1	0,4	2,1
0,25 – 0,10	10,7	25,5	13,2	6,7
0,10 – 0,05	15,5	15,7	28,0	21,3
0,05 – 0,01	24,6	17,0	21,6	30,4
0,01 – 0,005	19,4	18,9	11,1	18,3
менее 0,005	29,4	11,8	25,5	20,3
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,49	1,85	1,68	1,42

Таблица 2.42

**Средние значения регламентирующих химических показателей [116, 138]**

Участок	Концентрация, мг/кг										Класс
	НП	Фенолы	F	P	As	Hg	Kd	Pb	Cu	Zn	
Карантинная гавань	460	1,04	117,2	296	7,1	0,227	1,53	72,3	76,0	132	А-III
Заводская гавань	563	1,32	106,5	411	6,8	0,231	1,86	67,6	78,0	112	А-III
Нефтегавань	490	1,83	80,3	426	6,3	0,298	2,37	84,4	96,1	133	А-III
Практическая гавань	240	1,11	185,1	495	5,1	0,186	2,20	32,3	48,3	87	А-II
Новая гавань	362	1,47	165,3	315	5,5	0,220	2,40	41,8	47,7	98	А-III
Подходной канал	331	1,48	-	555	6,6	0,280	1,75	74,3	72,0	110	А-III
Морской отвал	185,0	0,41	61,6	250	5,7	0,082	0,10	14,4	35,1	78,5	А-I

**Морской торговый порт «Южный».** Порт «Южный» находится на акватории Аджалыкского лимана, в 25 км восточнее ОМТП. В акватории порта имеется МПК и внутренний (лиманский) канал.

К 1978 г. МПК был сооружен в проектных габаритах: глубина – 14,0 м, ширина – 180 м, длина – 2,9 км. В дальнейшем длина канала была увеличена до 3,7 км и до достижения естественных глубин 15,0 м.

Для движения судов по акватории сооружен внутренний (лиманский) канал с габаритами: длина – 2660 м, глубина – 15,0 м, ширина – 160,0 м [139, 140].

Объемы разработанного и складированного грунта в 2003-2010 гг. в акватории порта «Южный» представлены в Приложении Г.

Общий объем выполненных дноуглубительных работ при строительстве причала №9 в 2009-2010 составил 875 тыс. м<sup>3</sup>. Грунт складировался на морской подводный отвал VII порта «Южный» (рис. 2.15) [142–144].

Разработке и дампингу подлежали глинистые и суглинистые илы (II-III квартал), суглинки и суглинистые илы (IV квартал). Значения показателей физических свойств донных отложений приведены в табл. 2.43.

Таблица 2.43

**Гранулометрический состав и плотность грунтов дноуглубления [142–144]**

№ проб	Грунт	Содержание фракций, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
		1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,10-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	менее 0,005 мм	
1	Ил	-	2,0	4,0	22,0	27,0	28,0	17,0	1,38
2	Ил суглинистый	0,7	2,0	5,0	21,5	27,8	27,0	16,0	1,39
5	Ил	-	3,0	3,0	22,5	27,5	27,0	17,5	1,38
6	Ил суглинистый	0,5	2,7	4,5	21,0	26,3	27,5	16,5	1,39
9	Суглинки	2,0	3,0	7,0	18,5	22,5	24,5	22,5	1,82
10	Ил суглинистый	1,0	2,5	6,0	20,0	23,5	24,0	23,0	1,40

В соответствии с классификацией [87] грунты дноуглубления относятся к I-II группе по трудности разработки.

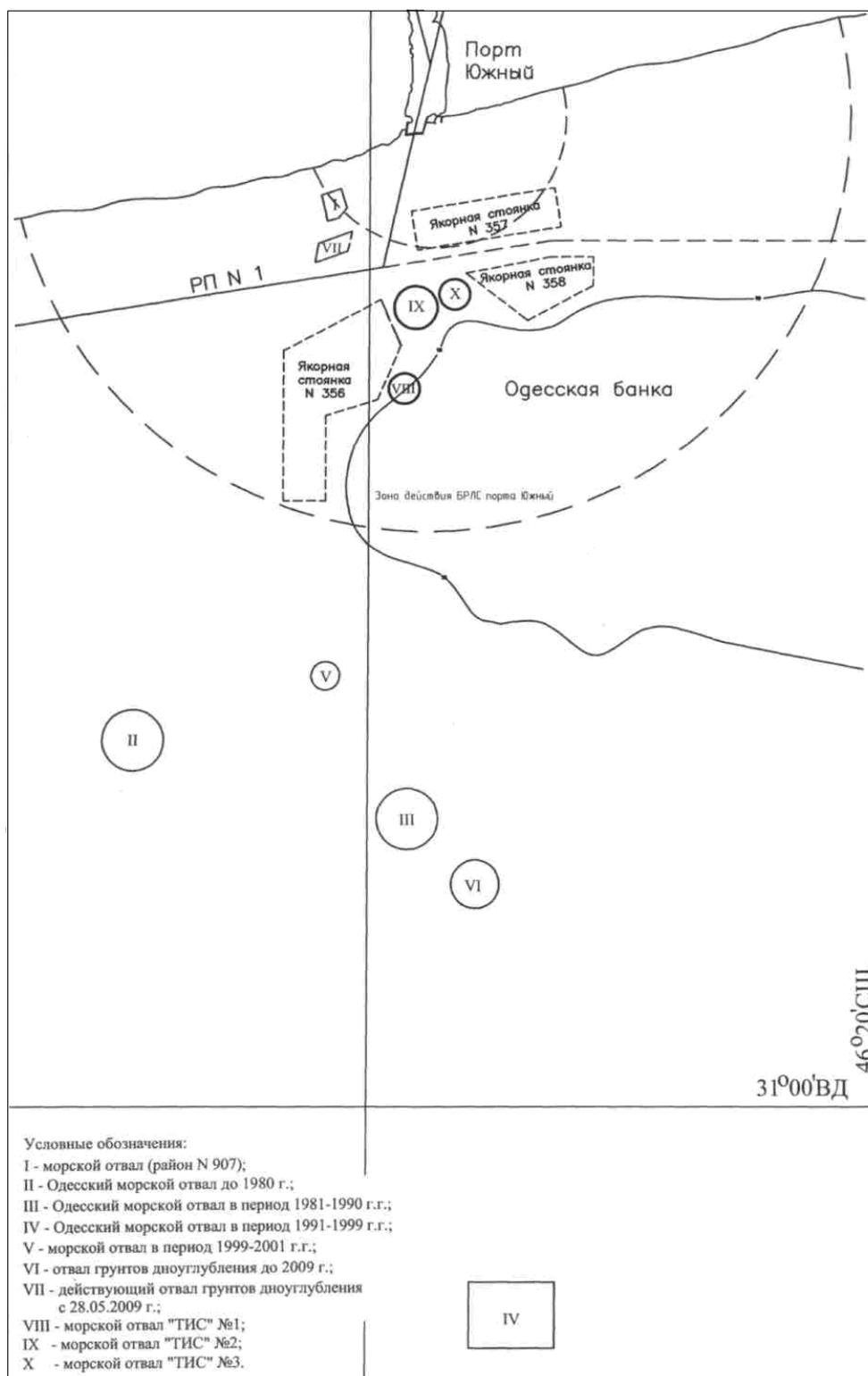


Рис. 2.15. Схема расположения мест складирования грунтов дноуглубления порта «Южный» [129].

Значения концентраций ЗВ в грунтах дноуглубления приведены в табл. 2.44.

**Значения концентраций ЗВ в донных отложениях [142–144]**

ЗВ	Средние концентрации, мг/кг							
	II квартал			III квартал		IV квартал		
	проба	проба	класс	илы	класс	илы	суглинки	класс
Ртуть	0,06	0,03	A	0,029	A	0,027	0,021	A
Кадмий	0,44	0,39	A	0,23	A	0,25	0,31	A
Свинец	18,0	15,2	I	25,5	II	25,0	28,4	II
Цинк	76,8	62,7	A-I	81,0	I	80,0	76,2	I
Медь	40,4	33,5	I	30,8	I	31,6	29,9	I
Мышьяк	5,9	6,1	I	6,1	II	6,0	5,8	II
НП	220	174	I-II	145	I	159	147	I
Фенолы	0,62	0,68	A	1,65	A	1,66	1,72	A
Фтор общий	5,5	5,1	A	21,9	A	22,3	18,7	A
Фосфор общий	216	187	A	411	A	403	387	A

Согласно классификации грунтов дноуглубления по степени их загрязненности разработанные грунты второго квартала относятся к II и I классу, третьего и четвертого – к A-II классу и могут быть складированы в подводный отвал при условии выплаты компенсационных платежей за загрязнение морской среды.

Дноуглубление выполнялось многочерпаковыми земснарядами. Грунт вывозился на морской подводный отвал, действующий с 28.05.2009 г. и представляющий собой четырехугольник (табл. 2.45 и рис. 2.15).

Таблица 2.45

**Характеристика отвала дноуглубления порта «Южный» [129]**

Расстояние до центра отвала, км	5,2
Координаты вершин	46°33'53" N      30°58'33" E
	46°34'05" N      30°59'22" E
	46°33'45" N      30°59'16" E
	46°33'32" N      30°58'27" E
Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	605
Емкость, млн. м <sup>3</sup>	3,47
Средняя глубина на месте отвала, м	19

В ходе реконструкции МПК и внутренних водных подходов к глубоководным причалам порта «Южный» в 2011 году планировалось проведение масштабных дноуглубительных работ на акватории СЗШЧМ и Малого Аджалыкского лимана. Общий объем дноуглубительных работ составлял  $14335000 \text{ м}^3$  из общей площади 191 га.

На основании комплексной оценки естественных условий шельфа, прилегающего к устью Григорьевского лимана, был определен новый морской отвал в виде окружности диаметром 2,4 км с центром в точке с координатами  $46^{\circ}24'48'' \text{ N}$ ,  $31^{\circ}00'00'' \text{ E}$  (рис. 2.16). Отвал состоит из шестнадцати загрузочных блоков №№ 1-16, представляющих окружности диаметрами 600 м. Общая грунтовместимость морского отвала составляет  $22,15 \text{ млн. м}^3$ .

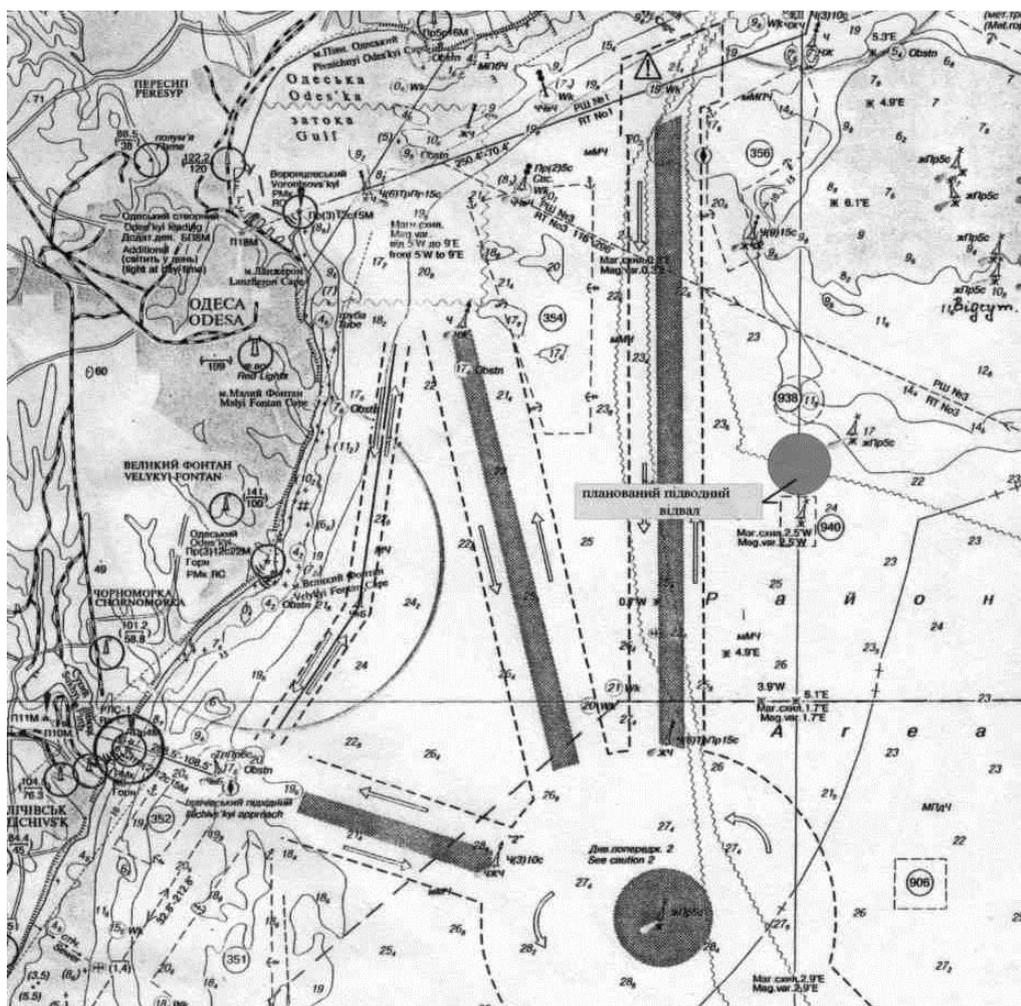


Рис. 2.16. Схема расположения подводного отвала грунтов МТП «Южный», проект 2011 г. [115].

Краткая характеристика метеорологических условий и гидрологического режима района подводного отвала представлена в табл. 2.46-2.47.

Таблица 2.46

**Метеорологические условия [115, 145]**

<b>Ветер</b>	
Преобладающее направление ветров	С – 19 % ЮЗ, СВ, Ю – 14-15 %
Преобладающее сезонное направление ветров зима весна лето осень	С, СВ, СЗ – 18-20 % Ю, ЮЗ, СВ – 15 % С – 23 %, Ю, ЮЗ – 17-19 % С – 21 %
Период наибольшей повторяемости ветров северных румбов южных румбов	зима весна
Преобладающее направление штормовых ветров со скоростями более 10 м/с (повторяемость) береговые вдольбереговые волноопасные направления	С (1,57 %), СВ (0,91 %) В (0,77 %) Ю (1,01 %), ЮЗ (0,76 %)
Повторяемость штормовых ветров, % со скоростями более 10 м/с более 15 м/с	6,96 0,40
Максимальная скорость ветра, м/с	35-37
Максимальная продолжительность штормового ветра со скоростью более 15 м/с, час	55-60
Расчетные скорости ветра, м/с (направление) 2 % 4 %	27 (СВ) 26 (СВ)
<b>Температура воздуха</b>	
Среднегодовая температура воздуха, °С максимальная (месяц) минимальная (месяц) абсолютный максимум абсолютный минимум	10,3 37 (август) -27 (февраль) 39,7 -29,7
<b>Осадки</b>	
Количество осадков, мм среднегодовое максимальное (месяц) минимальное (месяц) суточный максимум (месяц), мм/сутки	367 43-44 (июнь, ноябрь) 20 (март, апрель, сентябрь) 67 (август)

## Гидрологический режим [115, 145]

<b>Температура воды</b>			
Среднегодовая температура воды, °С		11,1	
максимальная (месяц)		28,6 (июль)	
минимальная (месяц)		-1,3 (февраль)	
<b>Соленость воды</b>			
Среднегодовая соленость воды, ‰		14,4	
максимальная (месяц)		20,6 (март)	
минимальная (месяц)		1,3 (май)	
<b>Волновой режим</b>			
Среднегодовая повторяемость волнения			
ветрового		90-95 %	
зыби		5-10 %	
Повторяемость преобладающего направления волнения, %			
С		20,26	
Ю		19,06	
ЮЗ		14,73	
Максимальные параметры волн			
высота, м		Ю, ЮЗ	Ю
длина, м		3,5	2,8
период, с		71	70
		5,0	5,0
Расчетные параметры волн для шторма 2 % повторяемости южного направления		Глубина	
высота (1 %), м		10	5
длина, м		4,2	4,0
период, с		55	43
		6,6	6,6
Расчетные параметры волн для шторма 5 % повторяемости южного направления		Глубина	
высота (1 %), м		10	5
длина, м		4,0	3,9
период, с		54	41
		6,5	6,5
<b>Течения</b>			
Вид течений	Условия формирования	Направление течения	Максимальная скорость, м/с
Ветровое	Местные ветры	По направлению ветра	0,6-0,7 (0,3)
Сточное	Сток Днепро-Бугских вод	Западное	0,1-0,3
Компенсационное	Ветры южных румбов	Южное	0,7
Штормовое вдольбереговое	Сильные и длительные южные ветры	Восточное	1,0-1,5
Циркуляционное	Сильные южные и северные ветры	Циркуляционное	0,6

Для изучения экологического состояния участка складирования грунтов в 2011 г. был проведен комплекс гидрофизических, гидрохимических (табл. 2.48) и гидробиологических (табл. 2.49-2.51) исследований [115, 145].

Таблица 2.48

**Основные гидрофизические и гидрохимические параметры водной среды  
на участке складирования грунтов [115, 145]**

№	Показатель	Единицы измерения	Морской подводный отвал	
			1	2
1	Температура воды	°С	17,9	17,8
2	рН	Единицы рН	8,0	8,0
3	Соленость	‰	15,0	15,0
4	O <sub>2</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	6,9	7,1
5	БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4,0	4,2
6	Азот нитритный	мг/дм <sup>3</sup>	0,007	0,006
7	Азот аммиачный	мг/дм <sup>3</sup>	0,8	0,5
8	Азот нитратный	мг/дм <sup>3</sup>	2,9	3,1
9	Фосфор общий	мг/дм <sup>3</sup>	0,03	0,04
10	ВВ	мг/дм <sup>3</sup>	2,7	2,6

Таблица 2.49

**Динамика численности и биомассы фитопланктона на участке дампинга**

№ станции	2006-2010 гг.		2011 г.	
	Численность, млн. кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	Численность, млн. кл./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
1	567	1,9	521	1,82
2	619	2,1	<b>498</b>	<b>1,77</b>
3	518	1,7	-	-

Таблица 2.50

**Динамика численности и биомассы зоопланктона на участке дампинга**

№ станции	2006-2010 гг.		2011 г.	
	Численность, тыс. экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	Численность, тыс. экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, г/м <sup>3</sup>
1	6,7	0,08	8,4	0,079
2	7,9	0,10	<b>7,9</b>	<b>0,076</b>
3	5,8	0,11	-	-

**Динамика численности и биомассы зообентоса на участке сброса грунтов**

№ станции	2006-2010 гг.		2011 г.	
	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
1	56	10,8	91	38,6
2	102	33,4	89	32,6
3	86	26,1	-	-
1*	-	-	99	30,2
<b>2*</b>	-	-	<b>37</b>	<b>11,7</b>

Полученные результаты исследований пространственного распределения основных гидрохимических параметров (табл. 2.48) показывают, что район морского отвала относится к категории антропогенно-эвтрофированных и характеризуется достаточно высоким содержанием биогенных веществ с преобладанием их органических форм.

По результатам наблюдений 2011 г. (табл. 2.51) на глубинах 10-12 м биомасса достигает 35-45 г/м<sup>2</sup>, а на 14-16 м эта величина обычно не превышает 25-28 г/м<sup>2</sup>. На глубинах 19-23 м отмечены участки черного ила, где донные сообщества значительно обеднены и их биомасса не превышает 10 г/м<sup>2</sup>.

Резюмируя результаты исследований, следует отметить, что выбранный отвал, расположенный на акватории участка № 2, характеризуется наиболее низкими количественными показателями развития донных сообществ.

Грунты, предполагаемые к складированию на подводном отвале, по степени загрязненности относятся к А-II классу (табл. 2.52-2.53) и могут складироваться в морские отвалы с выплатой соответствующих компенсационных платежей. Объем капитальных вложений, необходимых для компенсации ущерба, наносимого складированием 14,335 млн. м<sup>3</sup> грунта, составит 12,81 млн. грн.

На основании выполненных аналитических исследований донных отложений акватории МТП «Южный» и участка проектируемого отвала произведен сопоставительный анализ их состава и качества (табл. 2.52-2.53).

Таблица 2.52

**Средние значения физико-механических показателей грунтов  
складирования [115, 145]**

Показатели	Гранулометрический состав, %				
	Складируемые грунты				Донные отложения отвала
Размер фракций, мм	Ил	Супесь	Суглинок	Глина	Ил
1 – 0,5	0,1	0,5	1,0	1,0	1,0
0,5 – 0,25	2,2	3,0	1,0	2,0	3,0
0,25 – 0,10	6,2	10,8	1,0	4,7	9,3
0,10 – 0,05	23,0	20,2	21,0	12,8	18,7
0,05 – 0,01	26,6	28,7	35,0	30,2	25,6
0,01 – 0,005	18,7	20,0	15,0	23,0	21,1
менее 0,005	23,2	16,8	26,0	26,3	21,3
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,68	1,98	1,82	2,00	1,62

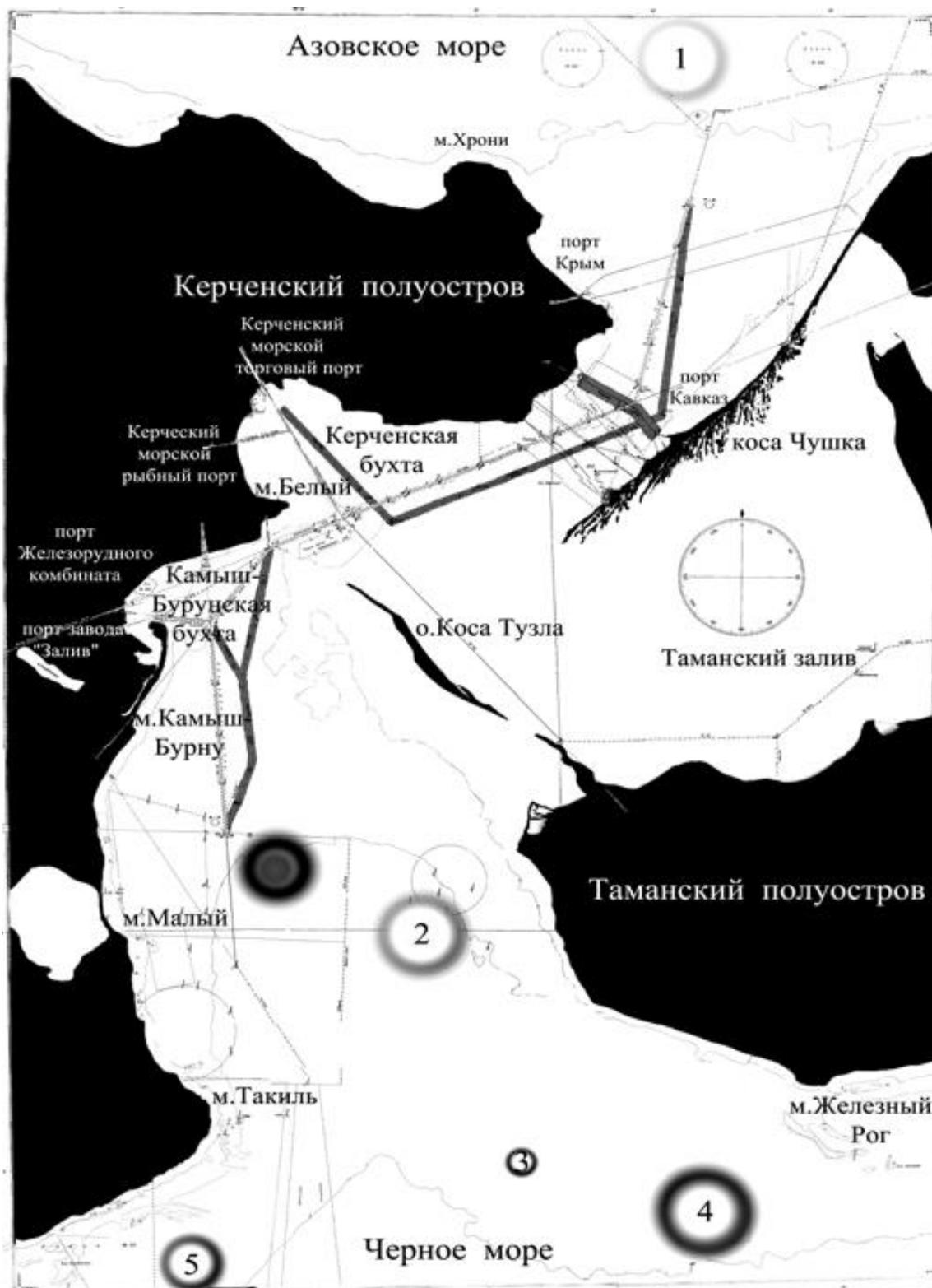
Таблица 2.53

**Средние значения регламентирующих химических показателей [115, 145]**

Участок опробования	Концентрация, мг/кг										Класс
	НП	Фенолы	F	P	As	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	
Акватория МТП «Южный»	115	1,22	55,3	262	6,1	0,05	0,45	16,3	26,7	57,5	А-II
Подходной канал МТП «Южный»	76	1,67	39,6	407	6,9	0,03	0,23	16,3	16,9	52,7	А-II
Морской отвал	94,0	1,07	34,5	240,0	5,1	<0,05	0,20	7,2	14,3	47,4	А-I

Сравнение средних значений химических (табл. 2.53) и физико-механических показателей (табл. 2.52) показывает, что физические показатели (плотность и взвесеобразующая фракция) практически не отличаются, а концентрации ЗВ отличаются незначительно.

**Керченское предпроливье.** Дампинг грунтов дноуглубления в Керченском регионе осуществляется в подводные отвалы, размещенные в Керченском проливе, в предпроливной зоне Черного и Азовского морей (рис. 2.17). Объем изъятых грунтов составляет 90-100 млн. м<sup>3</sup>.



#### Условные обозначения

⊙ – зоны дампинга: 1 - 4 – закрытые свалки, 5 – действующая свалка.

— — основной судоходный канал

Рис. 2.17. Расположения зон дампинга в Керченском проливе [146, 147].

Краткая характеристика метеорологических условий и гидрологического режима района складирования грунтов представлена в табл. 2.54-2.55.

Таблица 2.54

**Метеорологические условия [148]**

<b>Ветер</b>	
Преобладающее направление ветров	СВ (19 %), СЗ (16 %), З (14 %), С (14 %)
Период наибольшей повторяемости ветров северных румбов южных румбов	ноябрь – февраль апрель – май
Среднегодовая скорость ветра, м/с	5,2
Среднее число дней с сильным ветром	29
Повторяемость штормовых ветров (более 15 м/с), %	3,7
Максимальная скорость ветра, м/с	40
<b>Температура воздуха</b>	
Годовая температура воздуха, °С средняя максимальная (месяц) минимальная (месяц)	11,1 39 (август) -24 (февраль)
<b>Осадки</b>	
Среднегодовое количество осадков, мм	434
Суточный максимум осадков, мм/сутки	146

Таблица 2.55

**Гидрологический режим [148]**

<b>Температура воды</b>	
Среднегодовая температура воды, °С максимальная (месяц) минимальная (месяц)	12,7 29,8 (июль) -1,0 (январь)
<b>Волновой режим</b>	
Преобладающий вид волнения	ветровое
Преобладающее направление волнения	северо-восточное (20,2 %)
Наиболее волноопасное направление	южное
Период наибольшей штормовой активности	октябрь - февраль
Максимальная зафиксированная высота волны, м	2,65
Средние параметры волн (на глубине 5 м) высота, м длина, м период, с	0,5 14,0 3,0
Высота волны 5 % обеспеченности, м	0,8

Продолж. табл. 2.55

Течения	Направление	
	Азовское	Черноморское
Среднегодовая скорость, см/с	16	17
Среднегодовая повторяемость, %	62	38
Наибольшая среднемесячная скорость, см/с (месяц)	18 (февраль, июнь, декабрь)	23 (ноябрь)
Наибольшая среднемесячная повторяемость, % (месяц)	78 (октябрь)	60 (ноябрь)
Наибольшая среднемесячная продолжительность, сут	более 12	более 8

Для изучения экологического состояния района складирования грунтов в Керченском предпроливье в 2013 г. был проведен комплекс гидрохимических (табл. 2.56) и гидробиологических (табл. 2.57-2.59) исследований.

Таблица 2.56

**Основные гидрохимические параметры водной среды  
Керченского предпроливья [148, 149]**

	Горизонт	pH, ед.	O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Si, мг/дм <sup>3</sup>
Мин.	поверхность	8,29	8,17	0,92	н/о	0,006	0,035	0,007	0,029
	дно	8,31	8,33	0,80	н/о	0,008	0,042	0,016	0,038
Макс.	поверхность	8,41	8,94	1,12	0,041	0,011	0,078	0,052	0,156
	дно	8,40	9,15	0,94	0,062	0,011	0,084	0,033	0,086
Среднее	поверхность	8,37	8,64	0,99	0,014	0,008	0,050	0,030	0,065
	дно	8,37	8,61	0,89	0,016	0,009	0,055	0,025	0,061

Таблица 2.57

**Средняя численность (млн. кл./м<sup>3</sup>) и биомасса (мг/м<sup>3</sup>) основных групп  
фитопланктона в Керченском предпроливье [148, 149]**

Горизонт	Численность			Биомасса		
	Диатомовые	Перидини-евые	Прочие	Диатомовые	Перидини-евые	Прочие
0	84,5	7,8	92,9	136,5	51,3	20,3
Дно	74,7	8,4	76,6	133,3	44,9	13,9

Таблица 2.58

**Средние показатели численности и биомассы кормового зоопланктона в Керченском предпроливье [148, 149]**

Кормовой зоопланктон	Численность, экз./м <sup>3</sup>	Биомасса, мг/м <sup>3</sup>
	23644	40,92

Таблица 2.59

**Показатели уровня развития макрозообентоса в районе отвала [148, 149]**

Участки	Суммарный бентос		Кормовые организмы		Колич. видов, вид/м <sup>2</sup>
	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>	
I	1920	65,2	1640	17,40	11
II	400	247,5	360	7,50	8
III	2320	116,69	2320	116,69	11

Химические и физико-механические показатели грунтов складирования представлены в табл. 2.60-2.61.

Таблица 2.60

**Средние значения физико-механических показателей грунтов [148, 149]**

Показатели	Гранулометрический состав, %	
	Складируемые грунты	Грунты отвала
Размер фракций, мм	Песчано-илистые	Песчаные заиленные
> 10,0	-	34,5
10,0 – 5,0	-	24,2
5,0 – 2,0	1,1	14,7
2,0 – 1,0	0,7	3,9
1,0 – 0,5	0,6	1,4
0,5 – 0,25	0,9	1,8
0,25 – 0,10	11,6	8,1
0,10 – 0,05	36,1	11,4
0,05 – 0,01	12,7	-
0,01 – 0,005	35,6	-
менее 0,005	0,7	-
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,19	1,27

**Средние значения регламентирующих химических показателей [148, 149]**

Участок опробования	Концентрация, мг/кг						Класс
	НП	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	
Грунты дноуглубления	295	0,06	0,10	3,25	32,7	97,1	А-II
Перспективный район	276	0,02	0,03	1,22	35,3	47	А-II

Грунты дноуглубления по своему составу и свойствам относятся к А-II классу по степени загрязненности и могут быть складированы в подводном отвале с выплатой соответствующих компенсационных платежей.

Объем средств, необходимых для компенсаций прогнозируемого ущерба водной среде и биоресурсам при складировании на морском отвале 6,7 млн. м<sup>3</sup> грунта, составит 6,53 млн. грн.

***Выводы к разделу 2***

1. Основными географическими особенностями украинской части шельфа Черного моря являются мелководность и большой речной сток, влияющий на характеристики морских вод и создающий специфические условия.

2. Вертикальные распределения температуры и солености воды в шельфовой зоне в летний период года характеризуются выраженными температурными и соленостными скачками плотности, а в зимний – полной гомотермией и значительной изохалинностью на большей части акватории.

3. Водная толща СЗШЧМ характеризуется двухслойной циркуляцией, за исключением зимних месяцев с января по март, когда вся толща вод в результате конвективного перемешивания становится квазиоднородной. Эта особенность отличает СЗШЧМ от остальной части Черного моря, имеющей трехслойную структуру, и свидетельствует об определяющем влиянии морфологии СЗШЧМ на состояние и режим ее вод.

4. Над акваторией шельфовой зоны украинской части Черного моря в зимний период преобладают ветры северо-восточного, северного и северо-западного направлений, которые способствуют формированию постоянного

циклонического типа циркуляции вод со средней скоростью 0,2-0,3 м/с. Весной с ослаблением северо-восточных и восточных ветров скорости течений понижаются до 0,1-0,2 м/с. Летом за счет преобладания юго-западных и западных ветров поверхностные течения образуют антициклонический круговорот со средней скоростью 0,05-0,15 м/с.

5. В соответствии с особенностями режима ветра, максимальная интенсивность ветрового волнения приходится на период с октября по март, когда могут наблюдаться волны высотой 2-3 м. Наиболее часто наблюдаются волны высотой 0,5 м и ниже, повторяемость которых составляет 70-96 %.

6. Несмотря на негативные последствия, традиционный способ удаления грунта дноуглубления посредством сброса в подводные морские отвалы остается самым распространенным и массовым способом. Основными районами дноуглубления на СЗШЧМ являются баровая часть ГСХ Дунай – Черное море, акватории Белгород-Днестровского МТП, ИМТП, ОМТП и МТП «Южный», а также их подходные каналы. Объем дампинга за 2003-2013 гг. в указанных портах составил около 40 млн. м<sup>3</sup> грунта.

7. В грунтах дноуглубления портов СЗШЧМ и их подходных каналов чаще всего встречаются пылеватая (0,005-0,05 мм) и глинистая (менее 0,005 мм) фракции, составляющие в совокупности 60-80 %. Удельный вес (в суммарном количестве грунта) частиц менее 0,005 мм составляет примерно 20 %. Постоянной примесью является пылеватый песок (0,05-0,1 мм) – 5-25 % от общего количества грунта.

8. По степени загрязненности грунты дноуглубления СЗШЧМ характеризуются в целом как умеренно загрязненные (класс II), за исключением ИМТП (класс I – условно чистые грунты). Только в акватории ОМТП встречаются участки, где качество донных отложений по содержанию НП не соответствует экологическим требованиям, а степень загрязненности характеризует эти грунты как очень загрязненные (класс III). Степень загрязненности донных отложений свинцом, цинком и медью не превышает нормативов II класса, а для большинства акваторий по уровню содержания ТМ в донных отложениях грунты характеризуются как условно чистые.

### РАЗДЕЛ 3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ ПРИ ДАМПИНГЕ ГРУНТОВ

### 3.1. Постановка задачи

В результате залпового сброса грунта в водную среду образуется облако взвеси. По сравнению с окружающей водной средой в этом облаке наблюдается повышенное содержание полидисперсного ВВ, представленного фракциями частиц с различным диаметром и соответственно с различной гидравлической крупностью  $u_i$ , и растворенных ЗВ, которые были аккумулированы в грунте и перешли в водную среду после сброса грунта.

В данном разделе исследуется процесс распространения ВВ в водной среде, поскольку распространение растворенного вещества можно рассматривать как частный случай ( $u = 0$ ).

Представим образовавшийся объем повышенной мутности в виде цилиндра. Начало цилиндрической системы координат находится на поверхности воды в центре облака повышенной мутности. Горизонтальные полярные координаты обозначим  $\varphi$  (угол поворота от некоторого направления) и  $r$  (расстояние от вертикальной оси  $OZ$ ). Ось  $OZ$  направлена вертикально вниз. Система координат постоянно связана с рассматриваемым облаком независимо от того, находится ли оно на месте или дрейфует по течению.

В дальнейшем будем предполагать, что в горизонтальной плоскости осредненный по времени турбулентный поток ВВ одинаков во все стороны от оси  $OZ$ . Данное предположение позволяет считать равными значения концентрации ВВ в точках, расположенных на одной окружности в

горизонтальной плоскости с центром в начале системы координат. Таким образом концентрация ВВ в облаке повышенной мутности является функцией трех переменных  $C(t, r, z)$ .

Поступление ВВ в водную среду из атмосферы и со дна отсутствует. Поток ВВ, осаждающегося на дно (предполагается абсолютно сорбирующая поверхность), равен  $uC(t, r, H)$ , где  $t$  – время;  $H$  – глубина акватории.

### 3.2. Модель турбулентной диффузии взвеси в плоской постановке и ее решение

Дифференциальное уравнение турбулентной диффузии ВВ в полярной системе координат имеет вид [150]

$$\partial C/\partial t = D_r(\partial^2 C/\partial r^2) + D_r(\partial C/\partial r)/r - u(C/H), \quad (3.1)$$

где  $C$  – средняя по глубине концентрация ВВ, г/м<sup>3</sup>;

$t$  – время, отсчитываемое после сброса грунта, с;

$D_r$  – горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$H$  – глубина акватории, м;

$r$  – радиус, расстояние от центра системы координат в горизонтальной плоскости до рассматриваемой точки, м;

$u$  – гидравлическая крупность частиц, м/с.

В работе [150] приведен вывод дифференциального уравнения турбулентной диффузии ВВ в пространственной постановке задачи по объектной схеме (уравнение (3.1) является частным случаем). Изначально авторы [150] составили (3.1) при анализе известных диффузионных уравнений

в плоской постановке задачи в прямоугольных (например [29, 30]) и цилиндрических (например, в [151] для консервативного вещества при равенстве 0 расхода сточных вод) координатах.

В выбранной схеме облако повышенной мутности в горизонтальной плоскости имеет вид пятна круглой формы. Начальные и граничные условия можно записать в следующем виде [150]:

$$\begin{aligned} C(t,r) &= C_0, \text{ при } r \leq r_0 \text{ и } t = 0; \\ C(t,r) &= 0, \text{ при } r > r_0 \text{ и } t = 0; \\ uC(t,r) - D_B(\partial C/\partial z) &= 0, \text{ при } z = 0, t \geq 0; \\ \partial C/\partial z = 0 \text{ и } q_B = uC(t,r), &\text{ при } z = H, t \geq 0, \end{aligned}$$

где  $C_0$  – значение концентрации ВВ в облаке в начальный момент времени, г/м<sup>3</sup>;

$r_0$  – начальный радиус пятна, м;

$D_B$  – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии;

$q_B$  – вертикальный поток оседающего ВВ, г/(м<sup>2</sup>с).

Поток ВВ на поверхности акватории отсутствует, дно – абсолютно поглощающее.

Решим уравнение (3.1) методом конечных разностей. Этот метод широко применяется при решении дифференциальных уравнений в частных производных и его использование не нуждается в каком-либо обосновании [152–163]. Отметим лишь, что данный метод можно реализовать по явной, неявной или смешанной (неявно-явной) схемам [155, 157, 164, 165]. Явная и смешанная схемы при определенном соотношении параметров неустойчивы. Неявная схема абсолютно устойчива.

Решим сначала (3.1), используя явную конечно-разностную схему [166].

Будем рассматривать срез пятна взвеси от центра к периферии в некоторые моменты времени  $k$  с шагом  $\Delta t$ . На пятне с шагом  $\Delta r$  проведем окружности, центр которых совпадает с началом системы координат.

Пронумеруем получившиеся кольца от центра  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Предположим, что среднее значение сеточной функции (концентрации ВВ) в каждом кольце располагается в его середине. Таким образом, на  $k$ -м временном срезе пятна (рис. 3.1) значение сеточной функции в кольце с номером  $n$  получит обозначение  $C_{k,n}$ . Это значение будет находиться на расстоянии  $r_n = (2n-1)\Delta r/2$  от центра пятна. Значения же слева и справа от него в тот же момент времени будут иметь обозначение  $C_{k,n-1}$  и  $C_{k,n+1}$ . На следующем временном срезе  $k+1$  среднее значение концентрации ВВ в кольце  $n$  обозначим  $C_{k+1,n}$ .

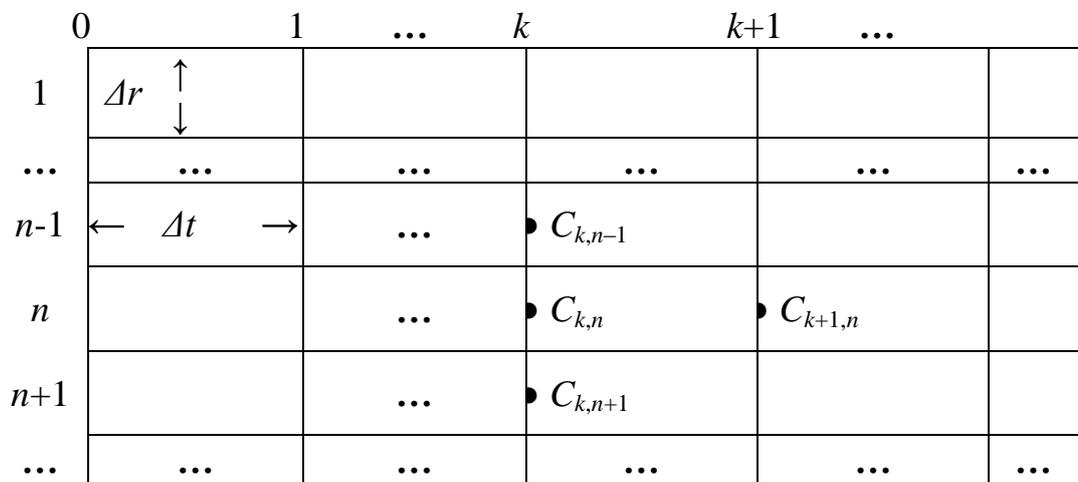


Рис. 3.1. Явная конечно-разностная схема решения дифференциального уравнения.

Запишем все частные производные в (3.1), используя принятые обозначения сеточной функции:

$$\partial C / \partial t = (C_{k+1,n} - C_{k,n}) / \Delta t; \quad (3.2)$$

$$\partial C / \partial r = (C_{k,n+1} - C_{k,n-1}) / (2\Delta r); \quad (3.3)$$

$$\partial^2 C / \partial r^2 = (C_{k,n+1} - 2C_{k,n} + C_{k,n-1}) / \Delta r^2. \quad (3.4)$$

Переменную  $r$  выразим через  $\Delta r$

$$r = (n\Delta r - \Delta r/2) = \Delta r(n - 1/2) = \Delta r(2n - 1)/2. \quad (3.5)$$

Подставляя выражения (3.2) – (3.5) в формулу (3.1), раскрывая скобки и решая ее относительно  $C_{k+1,n}$ , получим [150, 166–169]:

при  $n \geq 2$ ;

$$C_{k+1,n} = (1 - 2a - 2f)C_{k,n} + a(b_n C_{k,n+1} + d_n C_{k,n-1}), \quad (3.6)$$

при  $n = 1$

$$C_{k+1,1} = (1 - 2a - 2f)C_{k,1} + 2aC_{k,2}, \quad (3.7)$$

где  $a = D_T \Delta t / \Delta r^2$ ; (3.8)

$$f = u \Delta t / (2H); \quad (3.9)$$

$$b_n = 2n / (2n - 1); \quad (3.10)$$

$$d_n = (2n - 2) / (2n - 1). \quad (3.11)$$

Параметр  $2a$  представляет собой соотношение (коэффициент) Куранта [155, 162]. При решении классических задач диффузии (теплопроводности) методом сеток устойчивость явной схемы определяется условием  $2a < 1$ . Из формул (3.6) и (3.7) видно, что в нашем случае устойчивость схемы необходимо задать условием  $(a + f) < 0,5$ .

Упростим формулы (3.6) и (3.7), приняв параметр “ $a$ ” равным 0,25, тогда:

$$C_{k+1,n} = (0,5 - 2f)C_{k,n} + 0,25(b_n C_{k,n+1} + d_n C_{k,n-1}); \quad (3.12)$$

$$C_{k+1,1} = (0,5 - 2f)C_{k,1} + 0,5C_{k,2}, \quad (3.13)$$

при условии  $\Delta t = \Delta r^2 / (4D_T)$  (3.14)

Условие (3.14) получено из формулы (3.8).

Устойчивость явной схемы при  $a = 0,25$  задается условием  $f < 0,25$ .

Полученные уравнения (3.6), (3.7) и (3.12), (3.13) позволяют по значениям концентрации ВВ в пятне на  $k$ -м временном срезе рассчитать значения на следующем  $(k + 1)$ -м срезе. Расчет выполняется, начиная со среза  $k = 1$ . На предшествующем для него срезе ( $k = 0$ ) распределение значений концентрации

ВВ в пятне задается: в начальном количестве колец  $N_0$  предполагается равномерное распределение (можно задать любое распределение) ВВ с концентрацией  $C_0$ . На каждом шаге во времени количество колец в пятне увеличивается на 1, поэтому на  $k$ -м временном срезе общее количество колец в пятне составляет  $N = N_0 + k$ . При  $n > N$  значения  $C_{k,n} = 0$ .

Из формулы (3.6) видно, что сумма коэффициентов при значениях концентрации ВВ  $C_{k,n}$  и  $C_{k,n-1}$  равна  $(1 - 2a - 2f) + a(b_n + d_n) = (1 - 2f)$ . Это означает, что на  $(k + 1)$ -м временном срезе количество вещества в  $(1 - 2f)$  раза меньше, чем на предыдущем  $k$ -м. Исходя из этого, можно записать условие проверки расчетов на каждом временном срезе, учитывая, что показатель количества ВВ в  $n$ -м кольце равен  $(2n - 1)C_{k,n}$ , здесь  $(2n - 1)$  – относительная площадь кольца, [150, 166, 168, 170]

$$\sum_{n=1}^{N_0+k} (2n-1)C_{k,n} = (1-2f)^k \sum_{n=1}^{N_0} C_0 (2n-1) = C_0 N_0^2 (1-2f)^k, \quad (3.15)$$

где  $N_0$  и  $C_0$  – количество колец и значение концентрации ВВ в пятне на нулевом (начальном) временном срезе соответственно.

Явная конечно-разностная схема имеет преимущество в том, что решение на следующем временном срезе получается сразу по значениям сеточной функции на предыдущем срезе. Ее недостаток состоит в неустойчивости решения при  $(a + f) > 0,5$ . Неявная конечно-разностная схема (рис. 3.2), как говорилось выше, абсолютно устойчива. Однако решение по этой схеме требует использования метода прогонки. Рассмотрим это решение [166, 171].

Выразим частные производные по  $r$  в уравнении (3.1) в соответствии со схемой на рис. 3.2 (выражения для частной производной по  $t$  и переменной  $r$  остаются прежними):

$$\partial C / \partial r = (C_{k+1,n+1} - C_{k+1,n-1}) / (2\Delta r); \quad (3.16)$$

$$\partial^2 C / \partial r^2 = (C_{k+1,n+1} - 2C_{k+1,n} + C_{k+1,n-1}) / \Delta r^2. \quad (3.17)$$

	0	1	...	$k$	$k+1$	...
1	$\Delta r$					
...	...	...	...	...	...	...
$n-1$	$\leftarrow \Delta t \rightarrow$		...		$C_{k+1,n-1}$	
$n$			...	$C_{k,n}$	$C_{k+1,n}$	
$n+1$			...		$C_{k+1,n+1}$	
...	...	...	...	...	...	...

Рис. 3.2. Неявная конечно-разностная схема.

Подставим выражения (3.2), (3.5), (3.16) и (3.17) в (3.1), раскроем скобки и представим полученное выражение в следующем виде

$$\acute{\alpha}C_{k+1,n} = \beta_n C_{k+1,n+1} + \gamma_n C_{k+1,n-1} + \delta_n, \quad (3.18)$$

где  $\acute{\alpha} = (1+2a+2f)$ ;  $\beta_n = ab_n$ ;  $\gamma_n = ad_n$ ;  $\delta_n = C_{k,n}$ .

Обозначения  $a, f, b_n$  и  $d_n$  прежние (формулы (3.8) – (3.11)).

В нашем случае для любого временного среза выражение (3.18) представляет собой систему с  $N$  алгебраическими уравнениями. Матрица, соответствующая им, является трехдиагональной: по диагонали матрицы стоят коэффициенты  $\acute{\alpha}$ ; слева от них –  $\gamma_n$ ; справа –  $\beta_n$ ; остальные коэффициенты матрицы равны нулю. Такая система алгебраических уравнений решается методом прогонки [159, 160, 172–174].

Суть метода состоит в том, что на  $(k+1)$ -м временном срезе для прямого и обратного хода прогонки решение ищется в виде:

$$C_n = P_n C_{n+1} + Q_n; \quad (3.19)$$

$$C_{n-1} = P_{n-1} C_n + Q_{n-1}, \quad (3.20)$$

$$\text{где } P_n = \beta_n / \acute{\alpha} \quad \text{и} \quad Q_n = [\gamma_n C_{n-1} + \delta_n] / \acute{\alpha}. \quad (3.21)$$

Для удобства в уравнениях (3.19) и (3.20) индекс времени  $(k+1)$  убран.

Подставим в (3.18) вместо  $C_{n-1}$  формулу (3.20), для удобства индекс времени тоже уберем, и решим полученное выражение относительно  $C_n$ :

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}C_n &= \beta_n C_{n+1} + \gamma_n [P_{n-1}C_n + Q_{n-1}] + \delta_n; \\ [\dot{\alpha} - \gamma_n P_{n-1}]C_n &= \beta_n C_{n+1} + [\gamma_n Q_{n-1} + \delta_n]; \\ C_n &= \beta_n C_{n+1} / [\dot{\alpha} - \gamma_n P_{n-1}] + [\gamma_n Q_{n-1} + \delta_n] / [\dot{\alpha} - \gamma_n P_{n-1}].\end{aligned}\quad (3.22)$$

При сопоставлении формул (3.19) и (3.22) видно, что для прогоночных коэффициентов  $P_n$  и  $Q_n$  получены следующие рекуррентные соотношения:

$$P_n = \beta_n / [\dot{\alpha} - \gamma_n P_{n-1}] \quad \text{и} \quad Q_n = [\gamma_n Q_{n-1} + \delta_n] / [\dot{\alpha} - \gamma_n P_{n-1}]. \quad (3.23)$$

В начале рекуррентного процесса при  $n=1$  значения прогоночных коэффициентов  $P_1$  и  $Q_1$  известны, они равны:

$$P_1 = \beta_1 / \dot{\alpha} = 2a / (1+2a+2f) \quad \text{и} \quad Q_1 = \delta_1 / \dot{\alpha} = C_{k,1} / (1+2a+2f), \quad (3.24)$$

где  $C_{k,1}$  – значение сеточной функции в первом кольце на предыдущем временном срезе.

На прямом ходу прогонки, используя значения  $P_1$  и  $Q_1$ , по формулам (3.23) рассчитываются значения прогоночных коэффициентов  $P_n$  и  $Q_n$ .

В конце прямого хода при  $n=N$  по уравнению (3.19) видно, что  $C_N=Q_N$ , поскольку  $C_{N+1}=0$ . С этого момента начинается обратный ход прогонки: зная  $C_N$ , по формуле (3.20) рассчитываются значения сеточной функции в кольце с номером  $N-1$ . Потом  $N-2$  и так далее, до  $n=1$ .

Сумма коэффициентов  $\dot{\alpha}$ ,  $\beta_n$  и  $\gamma_n$  в (3.18) равна  $(1+2f)$ , поэтому по аналогии с (3.15) выражение для проверки расчетов можно записать в виде [166, 171]

$$\sum_{n=1}^{N_0+k} (2n-1)C_{k,n} = C_0 N_0^2 (1+2f)^{-k}. \quad (3.25)$$

Численные эксперименты показали, что из-за наличия погрешностей при расчете значений сеточной функции по неявной схеме, значения правой и левой частей условия (3.25) не совпадают. Причем погрешность зависит от исходных параметров модели: с увеличением начального количества колец в пятне  $N_0$ , погрешность увеличивается. Этот недостаток отсутствует при расчетах по явной схеме: на любом временном срезе, при любых исходных параметрах модели, обеспечивающих устойчивость решения, значения правой и левой частей условия (3.15) совпадают при любом количестве разрядов.

Явная и неявная схемы имеют первый порядок сходимости (точности) по времени и второй – по пространственной переменной. Они с разных сторон приближаются к аналитическому (истинному) решению. Смешанная схема имеет второй порядок сходимости по обеим переменным, т.е. у этой схемы сходимость по времени на порядок выше, чем у неявной и явной схем [160].

Рассмотрим неявно-явную схему [166, 171] (рис. 3.3). Поиск решения по ней осуществляется по явной и неявной схемам с весовыми коэффициентами  $(1-\sigma)$  и  $\sigma$ . Если  $\sigma = 0,5$ , то такая схема называется схемой Кранка-Николсона [156, 160]. Она обладает абсолютной устойчивостью решения.

	0	1	...	k	k+1	...
1	$\Delta r$ $\begin{matrix} \uparrow \\ \downarrow \end{matrix}$					
...	...	...	...	...	...	...
n-1	$\leftarrow \Delta t \rightarrow$	...	...	$\bullet C_{k,n-1}$	$\bullet C_{k+1,n-1}$	
n		...	...	$\bullet C_{k,n}$	$\bullet C_{k+1,n}$	
n+1		...	...	$\bullet C_{k,n+1}$	$\bullet C_{k+1,n+1}$	
...	...	...	...	...	...	...

Рис. 3.3. Смешанная конечно-разностная схема.

После подстановки (3.2) и (3.5), а также с коэффициентом 0,5 равенств (3.3), (3.4), (3.16) и (3.17) в (3.1) можно записать выражение аналогичное (3.18), полученному по неявной схеме,

$$\dot{\alpha}^{(1)}C_{k+1,n} = \beta_n^{(1)}C_{k+1,n+1} + \gamma_n^{(1)}C_{k+1,n-1} + \delta_n^{(1)}, \quad (3.26)$$

где  $\dot{\alpha}^{(1)} = (1+a+f)$ ;  $\beta_n^{(1)} = ab_n/2$ ;  $\gamma_n^{(1)} = ad_n/2$ ;

$$\delta_n^{(1)} = C_{k,n}(1-a-f) + \beta_n^{(1)}C_{k,n+1} + \gamma_n^{(1)}C_{k,n-1}.$$

Обозначения  $a, f, b_n$  и  $d_n$  прежние.

Решение (3.26) на  $(k+1)$ -м временном срезе выполняется методом прогонки по следующим соотношениям для прямого и обратного хода:

$$C_n = P_n C_{n+1} + Q_n; \quad (3.27)$$

$$C_{n-1} = P_{n-1} C_n + Q_{n-1}, \quad (3.28)$$

где  $P_n = \beta_n^{(1)}/\dot{\alpha}^{(1)}$  и  $Q_n = [\gamma_n^{(1)}C_{n-1} + \delta_n^{(1)}]/\dot{\alpha}^{(1)}$ . (3.29)

Рекуррентные соотношения для прямого хода прогонки при поиске прогоночных коэффициентов  $P_n$  и  $Q_n$  следующие:

$$P_n = \beta_n^{(1)}/[\dot{\alpha}^{(1)} - \gamma_n^{(1)}P_{n-1}] \text{ и } Q_n = [\gamma_n^{(1)}Q_{n-1} + \delta_n^{(1)}]/[\dot{\alpha}^{(1)} - \gamma_n^{(1)}P_{n-1}]. \quad (3.30)$$

Последовательность и условия расчета такие же, как для неявной схемы: при  $n=1$  значения прогоночных коэффициентов  $P_1$  и  $Q_1$  равны:

$$P_1 = \beta_1^{(1)}/\dot{\alpha}^{(1)} = a/(1+a+f) \text{ и } Q_1 = \delta_1^{(1)}/\dot{\alpha}^{(1)} = [(C_{k,1}(1-a-f) + aC_{k,2})]/(1+a+f), \quad (3.31)$$

при  $n = N$  значение  $C_N$  равно  $Q_N$ .

Сумма коэффициентов  $\dot{\alpha}^{(1)}$ ,  $\beta_n^{(1)}$  и  $\gamma_n^{(1)}$  равна  $(1+f)$ , а коэффициентов, входящих в  $\delta_n^{(1)}$ , составляет  $(1-f)$ . В этом случае условие проверки расчетов будет иметь следующий вид [166, 171]

$$\sum_{n=1}^{N_0+k} (2n-1)C_{k,n} = C_0 N_0^2 (1-f)^k (1+f)^{-k}. \quad (3.32)$$

Среди рассмотренных конечно-разностных схем явная схема более предпочтительна в силу однозначности вывода при невыполнении условия проверки расчетов: если условие (3.15) не выполняется – необходимо искать ошибку в алгоритме расчета. В других схемах это несовпадение заложено изначально. Оно вызвано погрешностями расчета значений концентрации ВВ на каждом временном срезе, и сюда же могут добавиться погрешности, вызванные ошибками в алгоритме расчета.

Решение по явной схеме имеет физический смысл. Например, равенство (3.13) показывает, что количество ВВ  $C_{k+1,n}$  в кольце с номером  $n$  на  $(k+1)$ -м временном срезе формируется за счет того, что часть ВВ  $C_{k,n}$  с коэффициентом  $(1-2a-2f)$  остается в этом кольце (переходит с предыдущего  $k$ -го среза) и за счет турбулентной диффузии с коэффициентами  $ab_n$  и  $ad_n$  переносится из соседних колец  $C_{k,n+1}$  и  $C_{k,n-1}$ .

При невыполнении условия устойчивости схемы ( $a+f > 0,5$ ) теряется физический смысл: в равенстве (3.13) первое слагаемое становится отрицательным (количество вещества, остающегося в пределах контрольной поверхности, не может быть с отрицательным знаком). Дальнейшие вычислительные эксперименты показали, что при неустойчивости решения по явной схеме, результаты расчета по неявной и Кранка-Николсона схемам существенно выделяются от выполненных ранее расчетов.

### 3.3. Модель турбулентной диффузии взвеси в пространственной постановке и ее решение

Дифференциальное уравнение турбулентной диффузии ВВ в цилиндрической системе координат с граничными и начальными условиями имеет вид [150]:

$$\partial C/\partial t = D_{\Gamma}[(\partial^2 C/\partial r^2) + (\partial C/\partial r)/r] + D_B(\partial^2 C/\partial z^2) - u(\partial C/\partial z); \quad (3.33)$$

$$C(t, r, z) = C_0, \text{ при } r \leq r_0 \text{ и } t = 0;$$

$$C(t, r, z) = 0, \text{ при } r > r_0 \text{ и } t = 0;$$

$$uC(t, r, z) - D_B(\partial C/\partial z) = 0, \text{ при } z = 0, t > 0;$$

$$\partial C/\partial z = 0 \text{ и } q_B = uC(t, r, z), \text{ при } z = H, t > 0.$$

В (3.33) обозначения прежние.

Уравнение (3.33), также как и (3.1) первоначально было получено при анализе диффузионных уравнений в пространственной постановке задачи в прямоугольных (например [29, 30, 151]) и цилиндрических (например, в [151]) для консервативного вещества при равенстве 0 расхода сточных вод) координатах. Авторы [150] показали правомерность записи уравнения в виде (3.33), выполнив его вывод по объектной схеме.

Решим уравнение (3.33) методом конечных разностей по явной схеме [16, 150, 169, 175, 176]. Будем рассматривать облако взвеси через равные интервалы времени  $\Delta t$ . Временные срезы обозначим индексом  $k$  (рис. 3.4). В облаке взвеси с шагом  $\Delta r$  проведем цилиндрические поверхности, ось которых совпадает с осью  $OZ$ . Нумерацию образовавшихся колец обозначим индексом  $n$  (общее количество колец в облаке на временном срезе  $k$  обозначим  $N_k$ ). По вертикали горизонтальными плоскостями облако взвеси разобьем на слои с шагом  $\Delta z$  (номер слоя обозначим индексом  $m$ , общее количество слоев по глубине –  $M_0$ ).

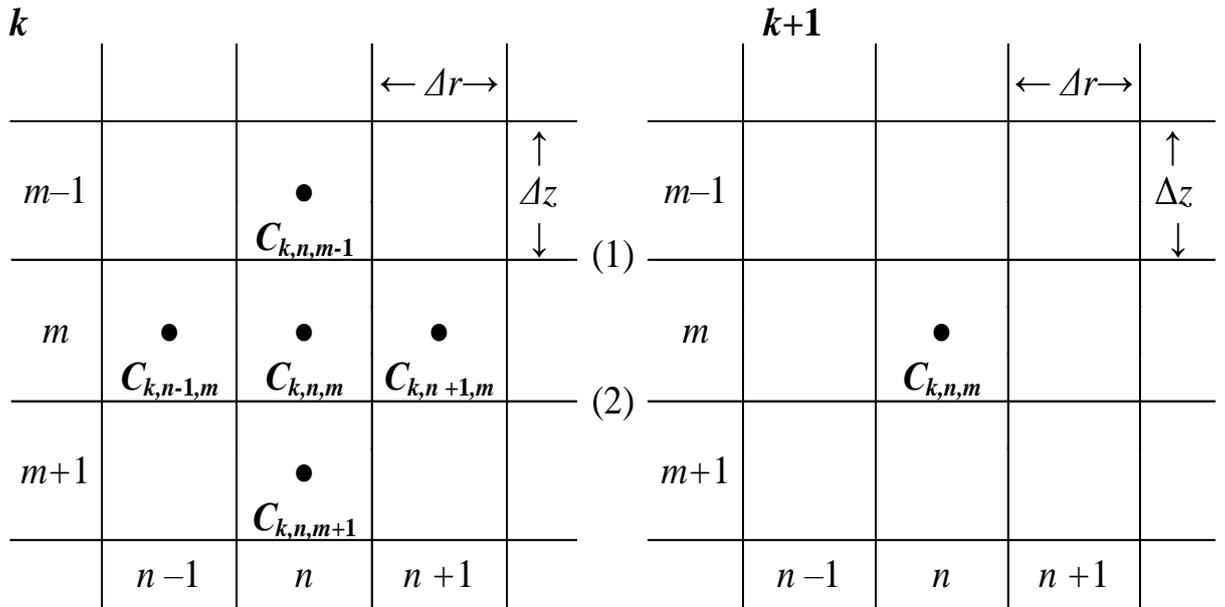


Рис. 3.4. Явная конечно-разностная схема решения дифференциального уравнения в пространственной постановке.

В облаке повышенной мутности на  $k$ -м и  $k+1$ -м временном срезе рассмотрим участок вертикального сечения, проходящего через ось  $OZ$ . В ячейках расчетной сетки значения концентрации ВВ получают индексы, показанные на рис. 3.4. Определим частные производные в (3.33) в соответствии с обозначениями на рис. 3.4:

$$\partial C / \partial t = (C_{k+1,n,m} - C_{k,n,m}) / \Delta t; \quad (3.34)$$

$$\partial^2 C / \partial r^2 = (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} - 2C_{k,n,m}) / \Delta r^2; \quad (3.35)$$

$$r = n\Delta r - \Delta r / 2 = \Delta r(2n-1) / 2; \quad (3.36)$$

$$\partial C / \partial r = (C_{k,n+1,m} - C_{k,n-1,m}) / (2\Delta r); \quad (3.37)$$

$$\partial^2 C / \partial z^2 = (C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - 2C_{k,n,m}) / \Delta z^2; \quad (3.38)$$

$$\partial C / \partial z = (C_{k,n,m+1} - C_{k,n,m-1}) / (2\Delta z). \quad (3.39)$$

Подставим (3.34)–(3.39) в уравнение (3.33) и решим относительно  $C_{k+1,n,m}$

$$C_{k+1,n,m} = (1 - 2a_1 - 2a_2)C_{k,n,m} + a_1(b_n C_{k,n+1,m} + d_n C_{k,n-1,m}) + (a_2 - f)C_{k,n,m+1} + (a_2 + f)C_{k,n,m-1}, \quad (3.40)$$

где  $a_1 = D_r \Delta t / \Delta r^2;$  (3.41)

$a_2 = D_B \Delta t / \Delta z^2;$  (3.42)

$f = u \Delta t / (2 \Delta z).$  (3.43)

$f$  – безразмерный параметр, учитывающий обмен ВВ между слоями и его удаление из водной среды за счет осаждения на дно.

Уравнением (3.40) нельзя пользоваться при расчетах в поверхностном и придонном слоях. Получим для этих слоев расчетные зависимости.

При выводе расчетного уравнения для поверхностного слоя используем схему, показанную на рис. 3.5.

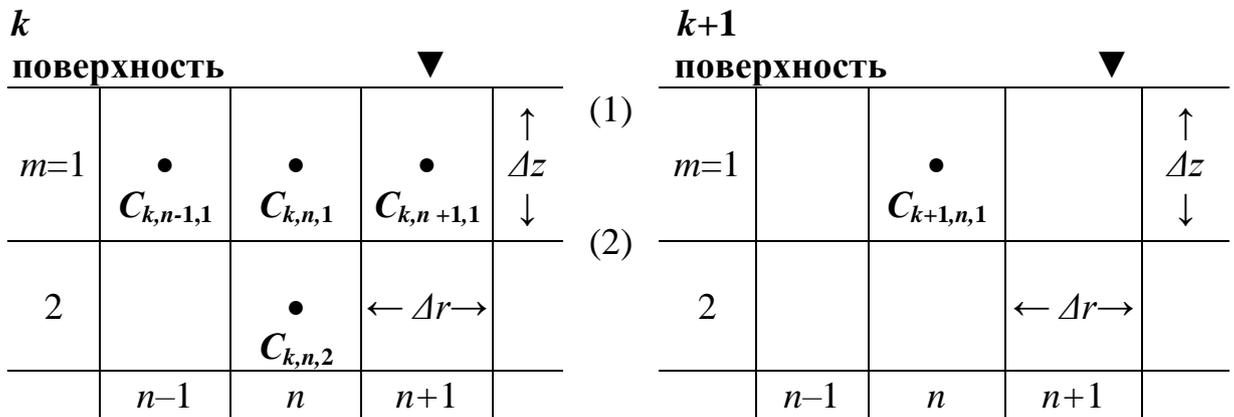


Рис. 3.5. Схема обозначений концентрации ВВ в ячейках расчетной сетки в поверхностном слое.

Частные производные в уравнении (3.33) в соответствии с рис. 3.5 будут равны:

$\partial C / \partial t = (C_{k+1,n,1} - C_{k,n,1}) / \Delta t;$  (3.44)

$\partial^2 C / \partial r^2 = (C_{k,n+1,1} + C_{k,n-1,1} - 2C_{k,n,1}) / \Delta r^2;$  (3.45)

$\partial C / \partial r = (C_{k,n+1,1} - C_{k,n-1,1}) / (2 \Delta r).$  (3.46)

Вторая разность по  $z$  определяется с учетом того, что на поверхности (граница (1)) отсутствует турбулентный обмен ВВ ( $\partial C / \partial z|_1 = 0$ )

$$\partial^2 C / \partial z^2 = [\partial C / \partial z|_2 - \partial C / \partial z|_1] / \Delta z = [(C_{k,n,2} - C_{k,n,1}) / \Delta z - 0] / \Delta z = (C_{k,n,2} - C_{k,n,1}) / \Delta z^2. \quad (3.47)$$

Найдем теперь в уравнении (3.33) частную производную по  $z$  (последнее слагаемое). При выводе уравнения (3.33) последнее слагаемое получено как разность между потоками оседающего ВВ на верхней и нижней гранях контрольного объема [150]

$$uC_{(1)} - uC_{(2)} = -u(\partial C / \partial z)\Delta z, \quad (3.48)$$

где  $C_{(1)}$  и  $C_{(2)}$  – средние значения концентрации ВВ на верхней и нижней гранях контрольного объема соответственно.

В поверхностном слое приток вещества через верхнюю границу отсутствует ( $uC_{(1)} = 0$ ). Выразив  $C_{(2)}$  через среднюю концентрацию в контрольном объеме и градиент концентрации на нижней границе, получим

$$\begin{aligned} uC_{(1)} - uC_{(2)} &= 0 - uC_{(2)} = -u[C_{k,n,1} + (\partial C / \partial z|_2)\Delta z / 2] = \\ &= C_{k,n,1} + [(C_{k,n,2} - C_{k,n,1}) / \Delta z]\Delta z / 2 = (C_{k,n,1} + C_{k,n,2}) / 2. \end{aligned}$$

Разность ( $uC_{(1)} - uC_{(2)}$ ) для поверхностного слоя будет равна

$$uC_{(1)} - uC_{(2)} = -u[(C_{k,n,1} + C_{k,n,2}) / 2]. \quad (3.49)$$

Из выражений (3.48) и (3.49) видно, что для поверхностного слоя

$$\partial C / \partial z = (C_{k,n,1} + C_{k,n,2}) / (2\Delta z). \quad (3.50)$$

При подстановке (3.36), (3.44)–(3.47) и (3.50) в (3.33) получим решение для поверхностного слоя в следующем виде

$$C_{k+1,n,1} = (1 - 2a_1 - a_2 - f)C_{k,n,1} + a_1(b_n C_{k,n+1,1} + d_n C_{k,n-1,1}) + (a_2 - f)C_{k,n,2}. \quad (3.51)$$

В уравнении (3.51) обозначения те же, что и в (3.40).

Для придонного слоя учтем, что на дне (граница (2)) турбулентный обмен ВВ отсутствует ( $\partial C/\partial z|_2 = 0$ ). При выводе расчетного уравнения для придонного слоя используем схему, приведенную на рис. 3.6.

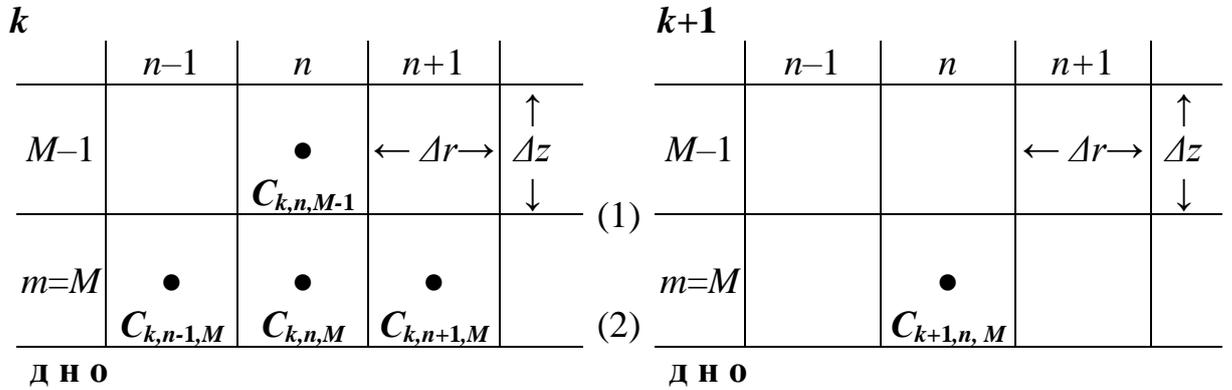


Рис. 3.6. Схема обозначений концентрации ВВ в ячейках расчетной сетки в придонном слое.

Для этого слоя в соответствии со схемой на рис. 3.6 частные производные в уравнении (3.33) будут иметь следующий вид:

$$\partial C/\partial t = (C_{k+1,n,M} - C_{k,n,M})/\Delta t; \quad (3.52)$$

$$\partial^2 C/\partial r^2 = (C_{k,n+1,M} + C_{k,n-1,M} - 2C_{k,n,M})/\Delta r^2; \quad (3.53)$$

$$\partial C/\partial r = (C_{k,n+1,M} - C_{k,n-1,M})/(2\Delta r); \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \partial^2 C/\partial z^2 &= (\partial C/\partial z|_2 - \partial C/\partial z|_1)/\Delta z = \\ &= [0 - (C_{k,n,M} - C_{k,n,M-1})/\Delta z]/\Delta z = (C_{k,n,M-1} - C_{k,n,M})/\Delta z^2. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Выражение (3.48) для придонного слоя справедливо, но с другой стороны

$$\begin{aligned} uC_{(1)} - uC_{(2)} &= u[(C_{k,n,M} - (\partial C/\partial z|_1)\Delta z/2) - (C_{k,n,M} + (\partial C/\partial z|_2)\Delta z/2)] = \\ &= u[(C_{k,n,M} - (\partial C/\partial z|_1)\Delta z/2) - (C_{k,n,M} + 0)] = -u(\partial C/\partial z|_1)\Delta z/2 = \\ &= -u[(C_{k,n,M} - C_{k,n,M-1})/\Delta z]\Delta z/2 = -u(C_{k,n,M} - C_{k,n,M-1})/2. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Из уравнения (3.48) и (3.56) видно, что для придонного слоя

$$\partial C / \partial z = (C_{k,n,M} - C_{k,n,M-1}) / (2\Delta z). \quad (3.57)$$

Подставив (3.36), (3.52)–(3.57) в (3.33), в итоге получим уравнение для придонного слоя

$$C_{k+1,n,M} = (1 - 2a_1 - a_2 - f)C_{k,n,M} + a_1(b_n C_{k,n+1,M} + d_n C_{k,n-1,M}) + (a_2 + f)C_{k,n,M-1}. \quad (3.58)$$

При  $\Delta r = \Delta z$  и  $a_1 = a_2 = 0,125$  уравнения (3.40), (3.51) и (3.58) можно записать в упрощенном виде:

$$C_{k+1,n,1} = (0,625 - f)C_{k,n,1} + 0,125(b_n C_{k,n+1,1} + d_n C_{k,n-1,1}) + (0,125 - f)C_{k,n,2}; \quad (3.59)$$

$$C_{k+1,n,m} = 0,5C_{k,n,m} + 0,125(b_n C_{k,n+1,m} + d_n C_{k,n-1,m}) + (0,125 - f)C_{k,n,m+1} + (0,125 + f)C_{k,n,m-1}; \quad (3.60)$$

$$C_{k+1,n,M} = (0,625 - f)C_{k,n,M} + 0,125(b_n C_{k,n+1,M} + d_n C_{k,n-1,M}) + (0,125 + f)C_{k,n,M-1}, \quad (3.61)$$

при  $\Delta t = \Delta r^2 / (8D_\Gamma)$  и  $f < 0,125$ .

Если по условиям задачи не представляется возможным приравнять  $\Delta r$  и  $\Delta z$ , то используются формулы (3.40), (3.51) и (3.58) при условии:

$$(a_1 + a_2) < 0,5; \quad (3.62)$$

$$f < a_2. \quad (3.63)$$

Условие (3.62) можно записать в виде ограничения шага по времени  $\Delta t$

$$\Delta t < \Delta t_{ПП} = 0,5 \left( \frac{D_\Gamma}{\Delta r^2} + \frac{D_B}{\Delta z^2} \right). \quad (3.64)$$

Условие (3.63) можно записать в виде ограничения толщины слоя  $\Delta z$  [150, 167, 168, 170, 176]

$$\Delta z < \Delta z_{\text{ПР}} = 2D_B/u. \quad (3.65)$$

Условие (3.65) позволяет рассчитать предельную толщину слоя  $\Delta z_{\text{ПР}}$ , при которой применимы полученные зависимости, и выбрать необходимую модель:

- при  $\Delta z_{\text{ПР}} \geq H_{\text{СР}}$  – можно использовать двумерную модель;
- при  $\Delta z_{\text{ПР}} < H_{\text{СР}}$  – используется трехмерная модель.

Все полученные формулы применимы и в случае растворенных в воде веществ. Для этого гидравлическую крупность ( $u$ ) надо приравнять к 0.

При анализе формул (3.40), (3.51) и (3.58) видно, что количество ВВ на срезе  $k+1$  в каждом кольце придонного слоя ( $m = M_0$ ) на  $2fC_{k,n,M}$  меньше, чем в момент  $k$  в соответствующем кольце того же слоя. Отсюда следует, что при расчетах в пространственной постановке задачи на каждом временном срезе должно выполняться равенство [150, 167, 168, 170]

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_k} (2n-1)C_{k,n,m} = C_0 M_0 N_0^2 - 2f \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{n=1}^{N_{k-1}} (2n-1)C_{i,n,M}, \quad (3.66)$$

где  $N_k = N_0 + k$  – количество колец в облаке взвеси в  $k$ -й момент времени;

$M_0$  и  $N_0$  – количество слоев и колец в облаке в начальный момент времени ( $k=0$ );

$C_0$  – концентрация ВВ в облаке в начальный момент времени;

$C_{i,n,M}$  – концентрация ВВ в  $i$ -й момент времени в кольце  $n$  в придонном слое.

Расчеты показали, что при устойчивости решения значения правой и левой частей условия (3.66) совпадают при любом количестве разрядов.

На основании решения в трехмерном пространстве – формулы (3.40), (3.51) и (3.58), разработан компьютерный модуль «Дампинг-взвесь», позволяющий исследовать распространение полидисперсного ВВ и определить характеристики облака повышенной мутности на КР от ТС грунта.

Разработанный модуль «Дампинг-взвесь» позволяет исследовать

распространение ВВ при более разнообразных начальных и граничных условиях, чем в плоской постановке:

- рассмотреть облако повышенной мутности не только с вертикальными внешними границами, но и с расширяющимися ко дну;
- исследовать процесс выноса ВВ из нижних слоев в верхние при неравномерном распределении концентрации ВВ по вертикали после сброса грунта;
- учесть разную направленность поверхностных и придонных течений, для чего необходимо сначала рассмотреть распространение верхней части облака, перемещающейся в одном направлении, потом нижней, перемещающейся в другом направлении (или наоборот);
- учесть изменение глубины при перемещении облака, для чего необходимо в зависимости от расстояния и уклона дна ступенчато добавлять или убирать слои по глубине.

### 3.4. Оптимизация параметров расчетных зависимостей в плоской и пространственной постановках задачи

Оценим погрешность расчетов значений концентрации ВВ выбранным методом и оптимизируем параметры сетки. Для этого рассмотрим максимальное значение концентрации ВВ ( $C_{MAX}$ ) на КР. Функцию  $C_{MAX}$  можно представить в следующем виде

$$C_{MAX}/C_0 = \varphi(T, D_{ГВ}, \Delta t, \Delta r, \Delta z, u, H, R_0),$$

где  $C_0$  – начальная концентрация ВВ;

$T$  – время переноса облака на КР;

$D_{ГВ}$  – горизонтальный или вертикальный коэффициент турбулентной диффузии;

$\Delta t$ ,  $\Delta r$  и  $\Delta z$  – параметры сетки;

$u$  – гидравлическая крупность ВВ;

$H$  – глубина акватории;

$R_0$  – начальный радиус пятна.

В соответствии с  $\pi$ -теоремой, имея 8 переменных и 2 размерные единицы ( $L$ ,  $T$ ), в пространственной задаче можно сгруппировать 6 безразмерных параметров:

$$k_{KP} = T/\Delta t; a_1 = D_{Г}\Delta t/\Delta r^2; a_2 = D_{В}\Delta t/\Delta z^2; f = u\Delta t/(2\Delta z); N_0 = R_0/\Delta r; M_0 = H/\Delta z. \quad (3.67)$$

В плоской постановке – 4:

$$k_{KP} = T/\Delta t; a = D_{Г}\Delta t/\Delta r^2; f = u\Delta t/(2H); N_0 = R_0/\Delta r. \quad (3.68)$$

Особенность конечно-разностных схем состоит в том, что значение рассматриваемой величины, полученное в результате расчета, зависит от параметров сетки. В случае плоской постановки задачи  $C_{MAX}$  на некотором удалении от места сброса зависит от начального количества колец в пятне взвеси ( $N_0$ ) и от количества шагов во времени ( $k_{KP}$ ). При этом, чем больше  $N_0$  (меньше  $\Delta r$ ) и  $k_{KP}$ , тем ближе оценка к аналитическому значению величины. В случае пространственной постановки задачи  $C_{MAX}$  зависит еще и от количества слоев в облаке повышенной мутности ( $M_0$ ).

Однако увеличение начального количества колец (слоев) влечет за собой увеличение объема вычислений. Очень большое количество расчетов не имеет практического смысла, поскольку, начиная с некоторого момента, погрешность между оценкой и истинным значением становится достаточно малой (приемлемой с практической точки зрения). Попытка дальнейшего снижения погрешности становится неоправданной из-за значительного увеличения количества расчетов. Найдем оптимальное решение, при котором точность

оценки и количество расчетов были бы приемлемыми [166, 171, 177–179].

Сначала исследуем конечно-разностную схему в плоской постановке: по явной схеме найдем необходимый минимум колец в пятне; далее, начиная с найденного минимума, оценим погрешность  $C_{MAX}$  при различных  $N_0$  и  $k_{KP}$  по явной и неявной схемам, поскольку явная и неявная схемы с разных сторон приближаются к аналитическому значению функции [166, 171, 177, 178].

Поиск необходимого минимума  $N_0$  в плоской постановке задачи выполнен при следующих условиях:

- исходное количество колец в пятне взвеси  $N_0$  равно 1;
- расчет выполняется по формулам (3.12) и (3.13) –  $a = const = 0,25$ ;
- из (3.68) видно, что при уменьшении  $\Delta r$  (увеличении  $N_0$ ) в  $l$  раз условие  $a = const$  будет соблюдено, если количество шагов на КР ( $k_{KP}$ ) и параметр  $f$  будут изменяться следующим образом

$$k_{KP} \sim l^2 \quad \text{и} \quad f \sim 1/l^2;$$

- при выполнении всех расчетов должно выполняться условие устойчивости явной схемы

$$(f+a) < 0,5.$$

Последовательность поиска:

- задано исходное количество шагов во времени  $\Delta t$  на КР (принято равным 10);
- при заданном  $f$  определено значение  $C_{MAX}$  на 10-м временном срезе;
- далее при  $N_0 = 2$  и параметре  $f$ , сниженном в 4 раза, смоделирован процесс, и на 40 срезе (количество срезов по сравнению с предыдущим расчетом увеличивается в 4 раза) найдено новое значение  $C_{MAX}$ ;
- расчеты выполнены при  $N_0 = 1 \div 8$  и  $f = 0,0 \div 0,2$ .

При расчетах концентрация ВВ в начальный момент времени принята равной 100 %.

Результаты проведенных расчетов в горизонтальной плоскости сведены в табл. 3.1. В первом столбце помещено начальное количество колец в пятне  $N_0$ , во втором – количество шагов во времени на КР ( $k_{KP}$ ).

Таблица 3.1

**Значения  $C_{MAX}$  на КР (в плоскости)**

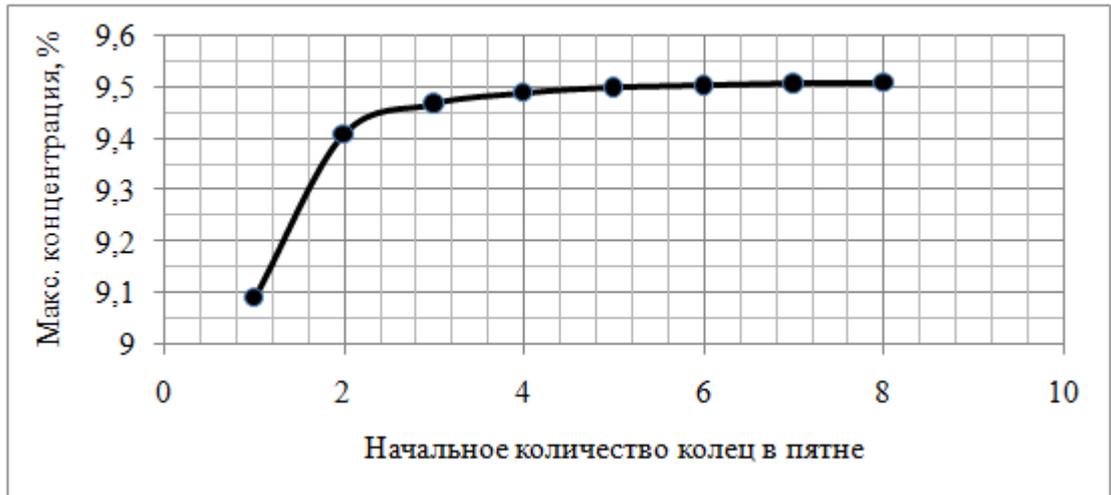
$N_0$	$k_{KP}$	$f = 0,0$	$f = 0,1$ (при $N_0 = 1$ )	$f = 0,2$ (при $N_0 = 1$ )
		$C_{MAX}, \%$	$C_{MAX}, \%$	$C_{MAX}, \%$
1	10	9,091	0,7809	0,0334
2	40	9,408	1,151	0,1256
3	90	9,468	1,226	0,1515
4	160	9,490	1,253	0,1612
5	250	9,499	1,266	0,1659
6	360	9,504	1,272	0,1684
7	490	9,507	1,276	0,1700
8	640	9,509	1,279	0,1710

Из табл. 3.1 и рис. 3.7 видно, что значения максимальной концентрации ( $C_{MAX}$ ) в пятне взвеси на КР интенсивно возрастает до  $N_0 = 3 \div 4$ , после чего практически не изменяются. Из этого следует, что начальное количество колец в пятне должно быть  $\geq 3$ .

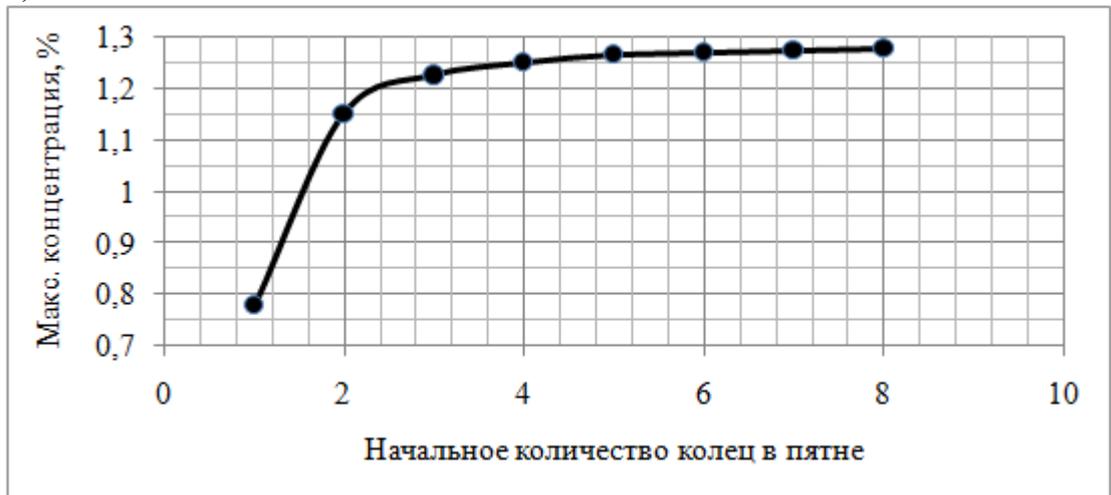
Для оценки погрешности результатов численных экспериментов были выполнены расчеты по неявной, Кранка-Николсона и явной схемам при различных  $N_0$  и  $k_{KP}$ , начиная с  $N_0 = 4$  и  $k_{KP} = 20$ . Результаты помещены в табл. 3.2 – 3.4 и показаны на рис. 3.8 – 3.10. В таблицах помещены значения  $C_{MAX}$ , полученные по неявной, Кранка-Николсона и явной схемам, а также относительное отклонение  $C_{MAX}$ , полученной по явной схеме, от  $C_{MAX}$ , полученной по схеме Кранка-Николсона.

В табл. 3.2 и на рис. 3.8 приведены результаты расчетов распространения ВВ при  $u = 0$ ; в табл. 3.3 и на рис. 3.9 – при  $u = 0,32$  см/с; в табл. 3.4 и на рис. 3.10 – при  $u = 1,38$  см/с. Значения гидравлической крупности частиц 0,32 и 1,38 см/с взяты из материалов изысканий ЧерноморНИИпроекта как одни из характерных значений для украинской части шельфа Черного моря.

а)



б)



в)

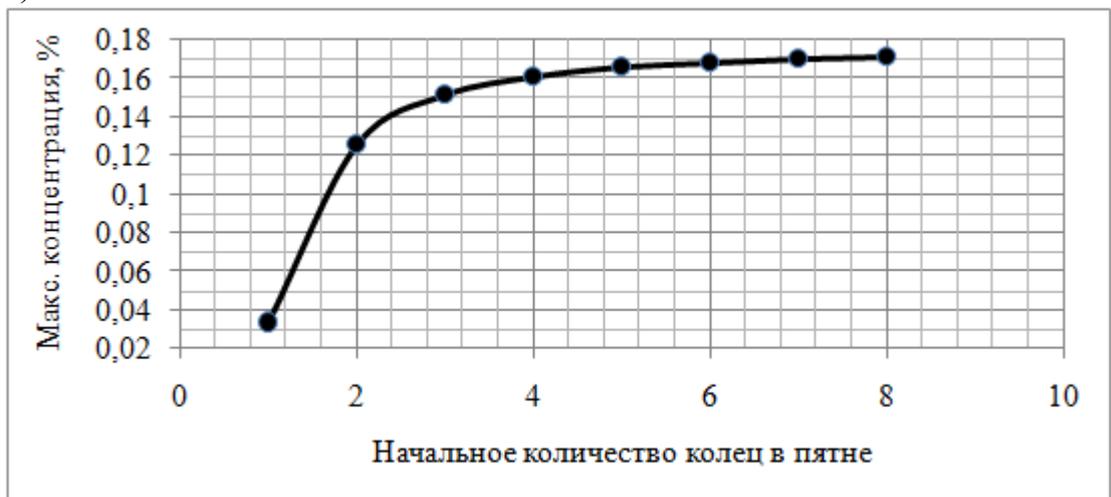
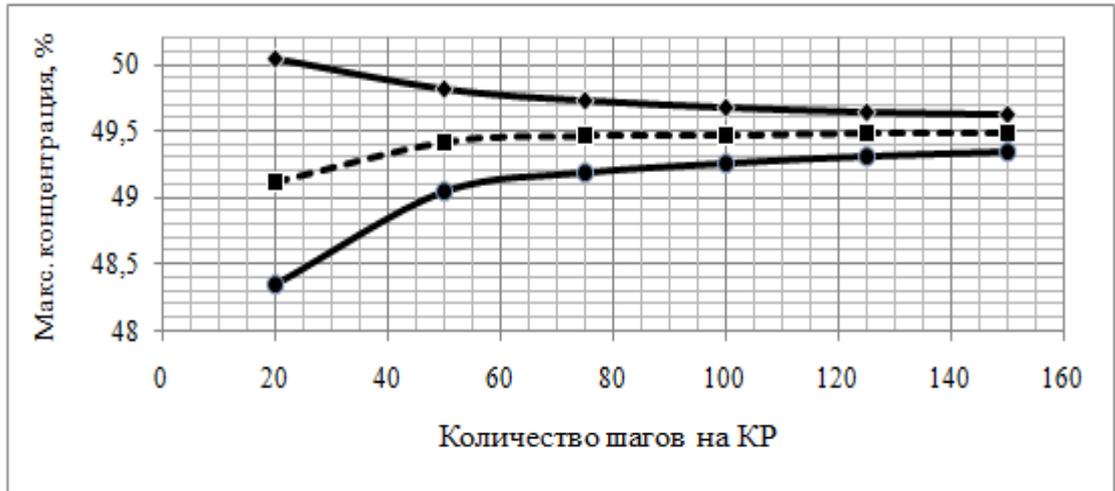


Рис. 3.7. Значения  $C_{MAX}$  по явной схеме в зависимости от  $N_0$ : а)  $f=0$ ; б)  $f=0,1$ ; в)  $f=0,2$  (значения  $f>0$  даны при  $N_0=1$ ).

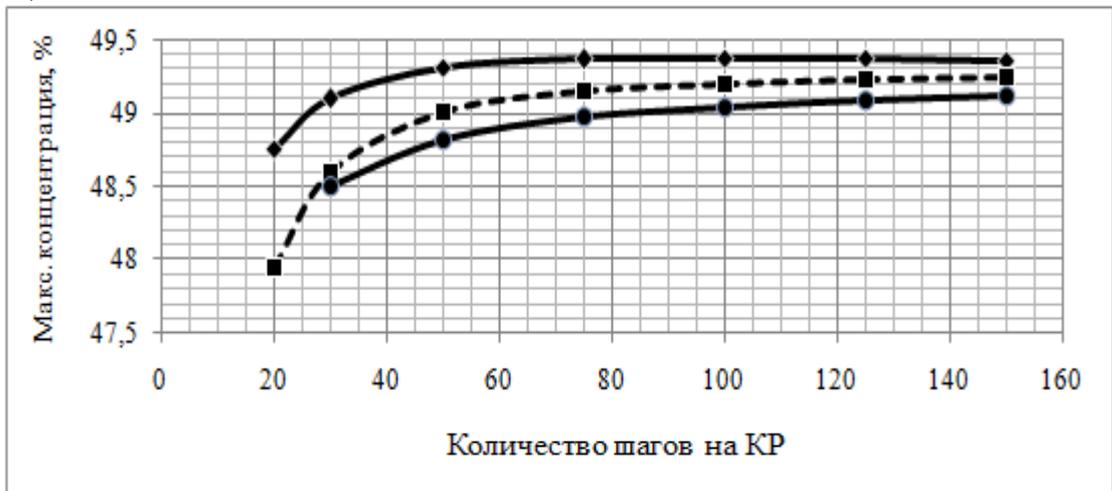
**Значения  $C_{MAX}$  на КР по неявной,  
Кранка-Николсона и явной схемам при  $u=0$**

$a$	$f$	$N_0$	$k_{KP}$	$C_{MAX}, \%$			Относ. отклон., %
				неявная	Кр.-Ник.	явная	
0,2962	0,0000	4	20	50,05	49,11	48,35	1,57
0,1185	0,0000	4	50	49,82	49,42	49,04	0,78
0,0790	0,0000	4	75	49,74	49,46	49,19	0,55
0,0592	0,0000	4	100	49,68	49,48	49,27	0,42
0,0474	0,0000	4	125	49,65	49,48	49,31	0,34
0,0395	0,0000	4	150	49,63	49,49	49,34	0,29
0,4628	0,0000	5	20	49,44	48,58	48,47	0,24
0,1851	0,0000	5	50	49,56	49,20	48,90	0,63
0,1234	0,0000	5	75	49,54	49,28	49,05	0,48
0,0926	0,0000	5	100	49,51	49,31	49,13	0,38
0,0740	0,0000	5	125	49,49	49,33	49,17	0,32
0,0617	0,0000	5	150	49,47	49,33	49,20	0,27
<b>0,6664</b>	0,0000	6	20	48,76	47,95	—	—
0,4443	0,0000	6	30	49,10	48,60	48,51	0,19
0,2666	0,0000	6	50	49,31	49,01	48,82	0,39
0,1777	0,0000	6	75	49,37	49,15	48,97	0,37
0,1333	0,0000	6	100	49,38	49,20	49,05	0,32
0,1066	0,0000	6	125	49,37	49,23	49,09	0,28
0,0889	0,0000	6	150	49,37	49,24	49,12	0,24
0,4739	0,0000	8	50	48,76	48,55	48,72	-0,35
0,3159	0,0000	8	75	49,03	48,89	48,89	-0,01
0,2369	0,0000	8	100	49,14	49,02	48,97	0,10
0,1896	0,0000	8	125	49,18	49,08	49,02	0,13
0,1580	0,0000	8	150	49,21	49,12	49,05	0,14
<b>0,7405</b>	0,0000	10	50	48,10	47,95	—	—
<b>0,4936</b>	0,0000	10	75	48,63	48,56	<b>49,35</b>	<b>-1,60</b>
0,3702	0,0000	10	100	48,86	48,81	48,93	-0,26
0,2962	0,0000	10	125	48,98	48,93	48,98	-0,11
0,2468	0,0000	10	150	49,05	49,00	49,01	-0,03
0,3554	0,0000	12	150	48,86	48,85	48,99	-0,28
0,4838	0,0000	14	150	48,65	48,68	48,98	-0,61

а)



б)



в)

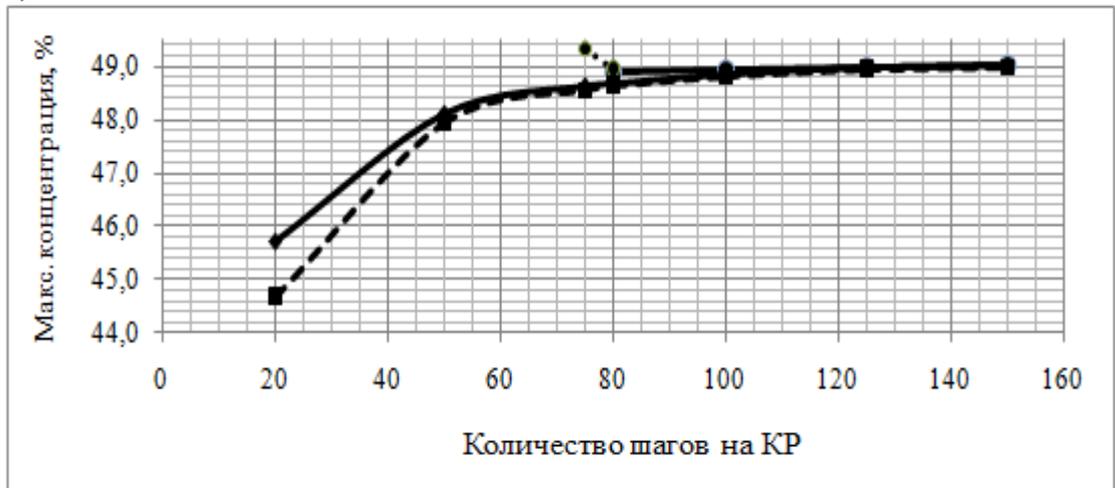


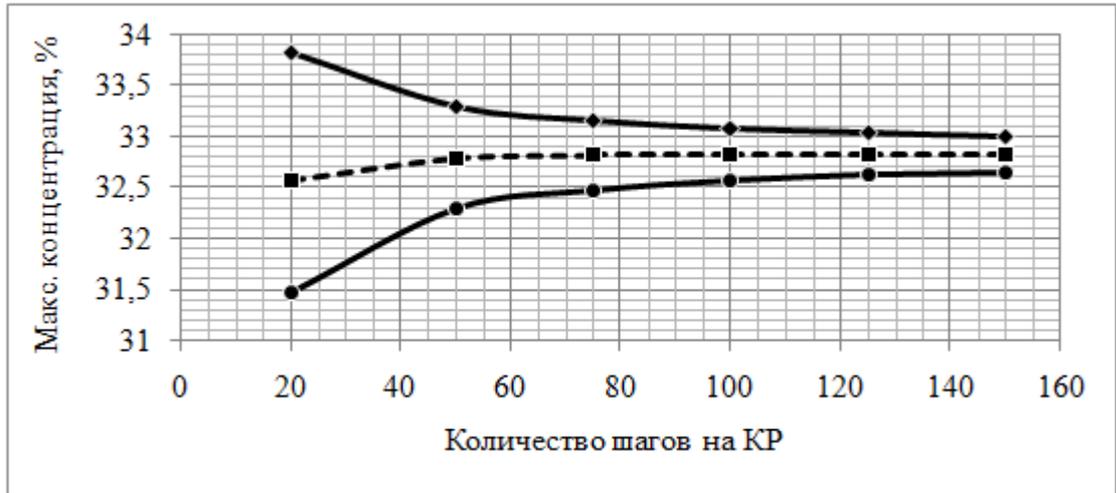
Рис. 3.8. Значения  $C_{MAX}$  по неявной (маркер ромб), Кранка-Николсона (пунктир) и явной (маркер круг) схемам в зависимости от  $k_{КР}$  при  $u = 0$ :

а)  $N_0 = 4$ ; б)  $N_0 = 6$ ; в)  $N_0 = 10$ .

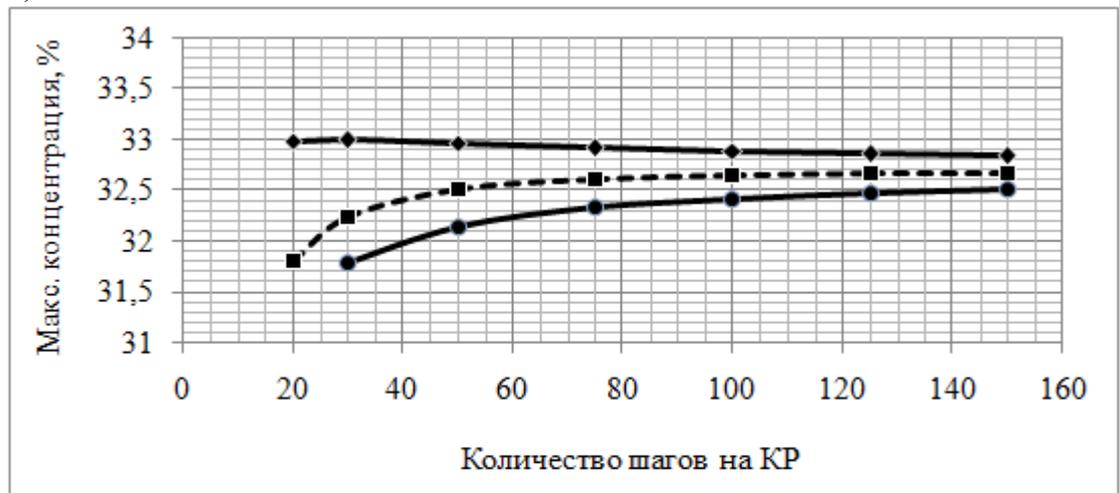
**Значения  $C_{MAX}$  на КР по неявной,  
Кранка-Николсона и явной схемам при  $u=0,32$  см/с**

$a$	$f$	$N_0$	$k_{KP}$	$C_{MAX}, \%$			Относ. отклон., %
				неявная	Кр.-Ник.	явная	
0,2962	0,0103	4	20	33,82	32,58	31,47	3,51
0,1185	0,0041	4	50	33,30	32,79	32,29	1,54
0,0790	0,0027	4	75	33,16	32,82	32,48	1,05
0,0592	0,0021	4	100	33,09	32,83	32,57	0,79
0,0474	0,0016	4	125	33,04	32,83	32,62	0,64
0,0395	0,0014	4	150	33,01	32,83	32,66	0,54
0,4628	0,0103	5	20	33,42	32,22	31,80	1,35
0,1851	0,0041	5	50	33,13	32,65	32,20	1,38
0,1234	0,0027	5	75	33,03	32,70	32,38	0,98
0,0926	0,0021	5	100	32,97	32,72	32,47	0,76
0,0740	0,0016	5	125	32,93	32,73	32,53	0,62
0,0617	0,0014	5	150	32,90	32,73	32,56	0,52
<b>0,6664</b>	0,0103	6	20	32,99	31,81	–	–
0,4443	0,0068	6	30	32,99	32,24	31,78	1,47
0,2666	0,0041	6	50	32,96	32,51	32,15	1,14
0,1777	0,0027	6	75	32,92	32,61	32,33	0,87
0,1333	0,0021	6	100	32,88	32,65	32,42	0,69
0,1066	0,0016	6	125	32,86	32,66	32,48	0,58
0,0889	0,0014	6	150	32,84	32,67	32,51	0,49
0,4739	0,0041	8	50	32,60	32,21	32,07	0,45
0,3159	0,0027	8	75	32,70	32,44	32,28	0,49
0,2369	0,0021	8	100	32,72	32,52	32,37	0,47
0,1896	0,0016	8	125	32,73	32,56	32,42	0,43
0,1580	0,0014	8	150	32,73	32,59	32,46	0,39
<b>0,4936</b>	0,0027	10	75	32,43	32,22	33,01	<b>-2,39</b>
0,4628	0,0026	10	80	32,46	32,26	32,28	-0,05
0,3702	0,0021	10	100	32,54	32,38	32,35	0,11
0,2962	0,0016	10	125	32,60	32,46	32,40	0,19
0,2468	0,0014	10	150	32,62	32,51	32,44	0,22
0,3554	0,0014	12	150	32,50	32,41	32,42	-0,03
0,4838	0,0014	14	150	32,36	32,30	32,42	-0,36
<b>0,6319</b>	0,0014	16	150	32,21	32,16	–	–

а)



б)



в)

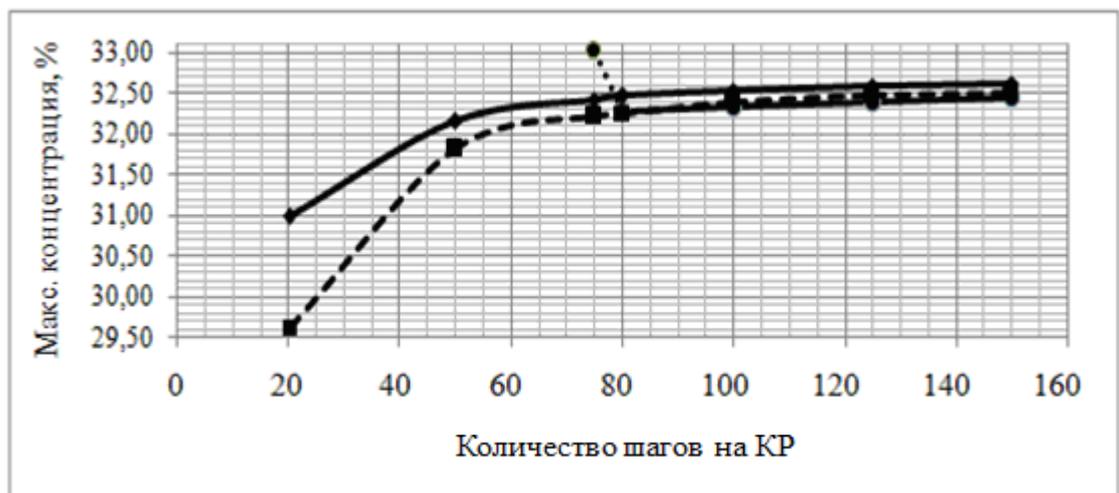


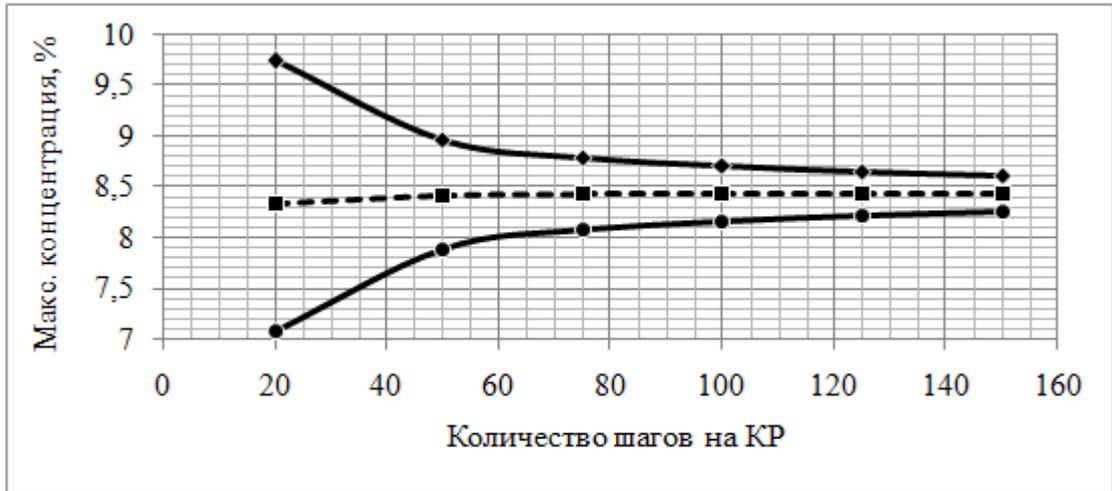
Рис. 3.9. Значения  $S_{MAX}$  по неявной (маркер ромб), Кранка-Николсона (пунктир) и явной (маркер круг) схемам в зависимости от  $k_{KP}$  при  $u=0,32$  см/с:

а)  $N_0 = 4$ ; б)  $N_0 = 6$ ; в)  $N_0 = 10$ .

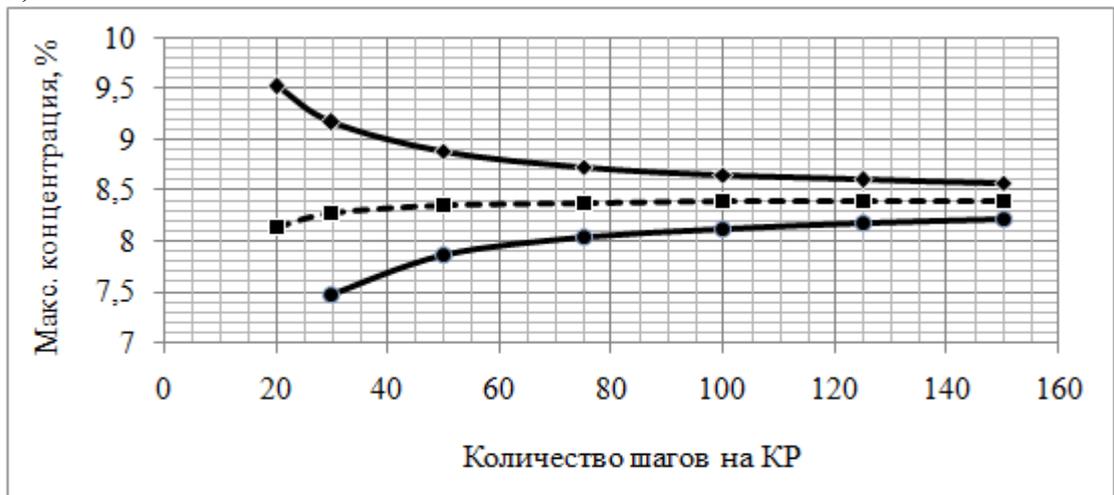
**Значения  $C_{MAX}$  на КР по неявной,  
Кранка-Николсона и явной схемам при  $u=1,38$  см/с**

$a$	$f$	$N_0$	$k_{KP}$	$C_{MAX}, \%$			Относ. отклон., %
				неявная	Кр.-Ник.	явная	
0,2962	0,0442	4	<b>20</b>	9,74	8,34	7,09	<b>17,72</b>
0,1185	0,0177	4	50	8,97	8,42	7,89	6,71
0,0790	0,0118	4	75	8,79	8,43	8,07	4,42
0,0592	0,0088	4	100	8,71	8,43	8,16	3,30
0,0474	0,0071	4	125	8,65	8,43	8,22	2,63
0,0395	0,0059	4	150	8,62	8,44	8,25	2,19
<b>0,4628</b>	<b>0,0442</b>	5	20	9,64	8,25	9,02	<b>-8,45</b>
0,1851	0,0177	5	50	8,92	8,38	7,87	6,55
0,1234	0,0118	5	75	8,76	8,40	8,05	4,35
0,0926	0,0088	5	100	8,68	8,41	8,14	3,26
0,0740	0,0071	5	125	8,62	8,41	8,19	2,61
0,0617	0,0059	5	150	8,59	8,41	8,23	2,17
<b>0,6664</b>	<b>0,0442</b>	6	20	9,53	8,15	—	—
<b>0,4443</b>	<b>0,0295</b>	6	30	9,17	8,27	7,47	<b>10,73</b>
0,2666	0,0177	6	50	8,88	8,35	7,86	6,30
0,1777	0,0118	6	75	8,73	8,38	8,04	4,24
0,1333	0,0088	6	100	8,65	8,39	8,13	3,20
0,1066	0,0071	6	125	8,61	8,39	8,18	2,57
0,0889	0,0059	6	150	8,57	8,39	8,22	2,15
<b>0,4739</b>	<b>0,0177</b>	8	50	8,79	8,27	7,85	<b>5,41</b>
0,3159	0,0118	8	75	8,67	8,33	8,02	3,85
0,2369	0,0088	8	100	8,61	8,35	8,11	2,97
0,1896	0,0071	8	125	8,57	8,37	8,17	2,42
0,1580	0,0059	8	150	8,55	8,37	8,20	2,04
<b>0,4936</b>	<b>0,0118</b>	10	75	8,61	8,28	11,01	<b>-24,84</b>
0,4628	0,0111	10	80	8,60	8,29	8,04	3,09
0,3702	0,0088	10	100	8,57	8,32	8,11	2,61
0,2962	0,0071	10	125	8,54	8,34	8,16	2,18
0,2468	0,0059	10	150	8,52	8,35	8,20	1,87
0,3554	0,0059	12	150	8,49	8,33	8,19	1,62
0,4838	0,0059	14	150	8,45	8,30	8,19	1,29

а)



б)



в)

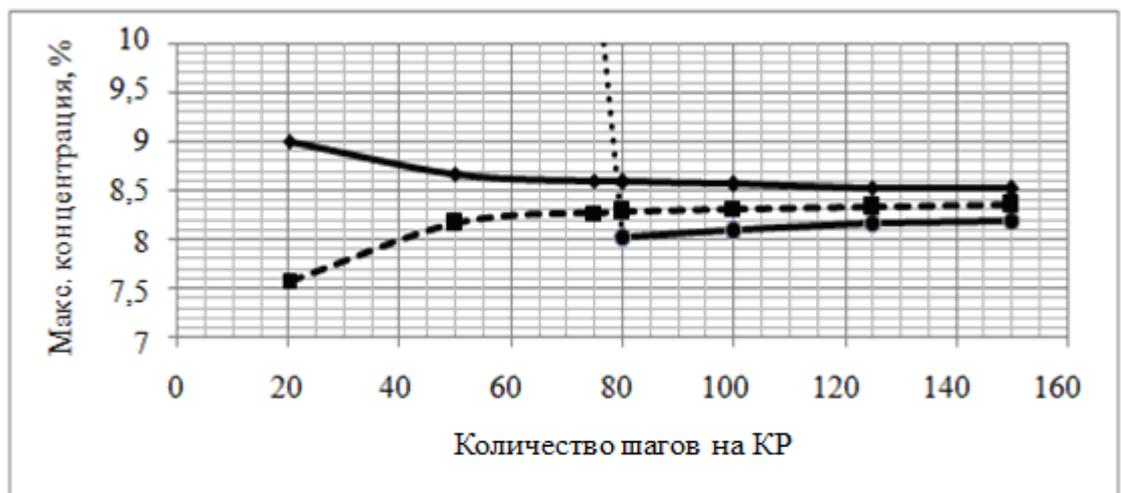


Рис. 3.10. Значения  $S_{MAX}$  по неявной (маркер ромб), Кранка-Николсона (пунктир) и явной (маркер круг) схемам в зависимости от  $k_{KP}$  при  $u = 1,38$  см/с:

а)  $N_0 = 4$ ; б)  $N_0 = 6$ ; в)  $N_0 = 10$ .

Из рис. 3.8-3.10 видно, что при различных  $u$  и  $N_0$  расхождение результатов экспериментов, полученных по разным схемам, быстро уменьшается с увеличением  $k_{KP}$  (уменьшением  $\Delta t$ ) примерно до 60-70 шага. После 70-80 шага сближение результатов становится менее интенсивным.

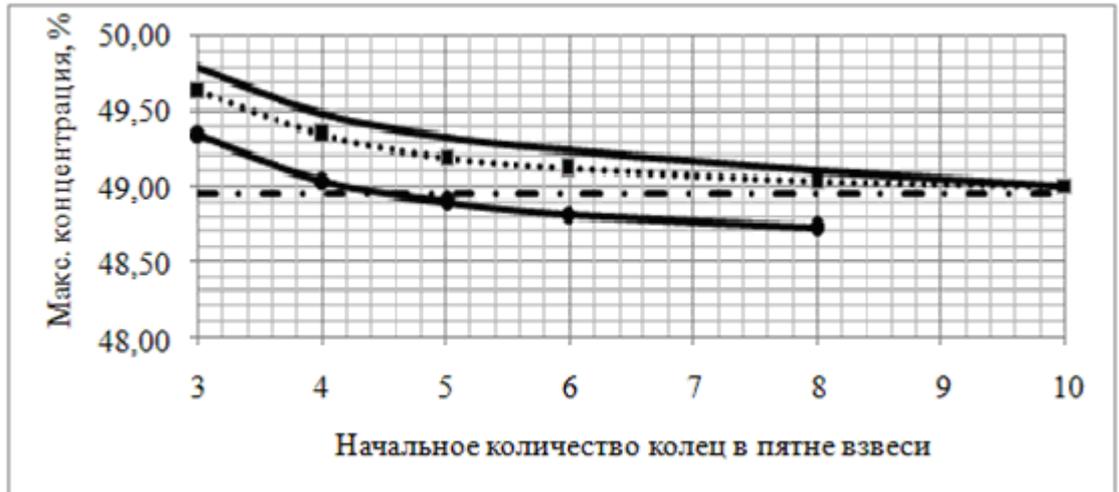
Закономерно результаты эксперимента по смешанной (Кранка-Николсона) схеме находятся между результатами, полученными по неявной и явной схемам, т.к. (см. ранее) у этой схемы сходимость по времени на порядок выше. В данном случае, при неизвестном аналитическом решении, будет логичным в качестве ориентира при оценке погрешности численных экспериментов использовать результаты, полученные по смешанной схеме.

Анализ полученных результатов [166, 171] (табл. 3.2-3.4) показал, что при условии сходимости явной схемы отклонение  $C_{MAX}$  по этой схеме от  $C_{MAX}$  по схеме Кранка-Николсона в плоской постановке задачи не будет превышать 4-5 % при  $N_0 \geq 4$ ,  $k_{KP} \geq 75$  и  $(a + f) < 0,49$ . При  $0,49 \leq (a + f) < 0,5$  отклонение резко возрастает (см. рис. 3.8-в, 3.9-в и 3.10-в обозначено точечными отрезками) и становится непредсказуемым. Увеличение  $k_{KP}$  до 100 приводит к снижению отклонения до 3 – 4 %.

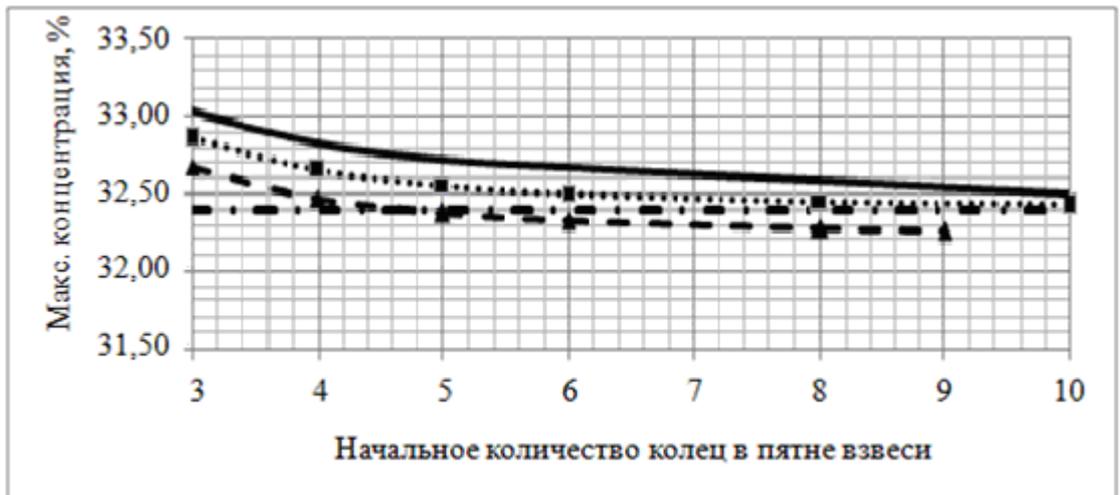
На рис. 3.11 показано изменение  $C_{MAX}$ , рассчитанной по явной схеме, в зависимости от  $N_0$  и  $k_{KP}$  для различных  $u$ . Из рис. 3.11 видно, что оценка  $C_{MAX}$  с ростом  $N_0$  имеет тенденцию к снижению. Поэтому для  $u \leq 0,32$  см/с,  $N_0 = 3-8$  и  $k_{KP} = 50$  (рис. 3.11-а) результат расчета по явной схеме очень близок к аналитическому решению. Верхняя огибающая на рис. 3.11-а стремится к значению примерно 49,0 (обозначено осевой линией), а значения  $C_{MAX}$  при  $N_0 = 3-8$  и  $k_{KP} = 50$  (кривая с маркером круг) изменяются от 49,4 до 48,7.

Из рис. 3.11-б ожидаемое аналитическое значение составляет примерно 32,4 (обозначено осевой линией), при  $k_{KP} = 75$  и  $N_0 = 3-9$  значения  $C_{MAX}$  изменяются от 32,7 до 32,2. При  $u = 1,38$  см/с (рис. 3.11-в) упомянутая выше тенденция выражена слабее. Однако видно, что при  $k_{KP} = 75$  и  $N_0 = 3-8$  значения  $C_{MAX}$  изменяются от 8,1 до 8,0, эти значения отклоняются от ожидаемого аналитического решения, равного примерно 8,3, не более чем на 4 %.

а)



б)



в)

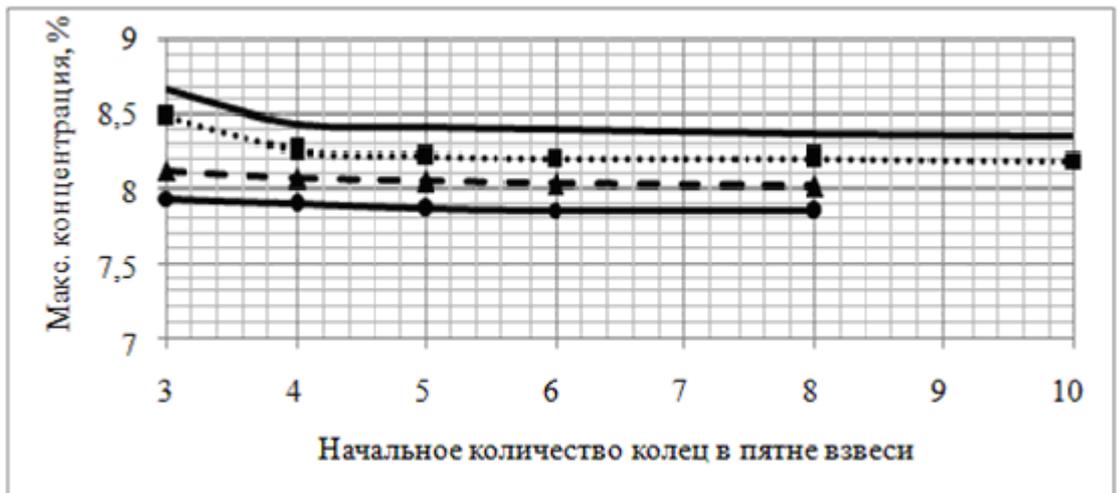


Рис. 3.11. Зависимость  $C_{MAX}$ , рассчитанной по явной схеме, от  $N_0$  и  $k_{KP}$  (маркер круг –  $k_{KP}=50$ ; треугольник –  $k_{KP}=75$ ; ромб –  $k_{KP}=100$ ; квадрат –  $k_{KP}=150$ ), верхняя линия без маркеров –  $C_{MAX}$  по схеме Кранка-Николсона при  $k_{KP}=150$ :  
а)  $u = 0$ ; б)  $u = 0,32$  см/с; в)  $u = 1,38$  см/с.

Оценим теперь погрешность алгоритмов расчета по рассматриваемым схемам. В условиях проверки расчетов (3.15), (3.25) и (3.32) правые и левые части характеризуют количество ВВ в пятне. Правая часть выражений представляет собой аналитическую зависимость массы ВВ в пятне от времени для данной схемы. Левая часть является результатом расчета по схеме. Обе части содержат погрешность метода, т.е. погрешность представления частных производных в виде разности значений сеточной функции. Левая часть дополнительно может содержать погрешность алгоритма расчета.

Для явной схемы условие (3.15) выполняется абсолютно, т.е. в схеме отсутствует погрешность алгоритма расчета. Для неявной и Кранка-Николсона схем условия (3.25) и (3.32) выполняются с некоторой погрешностью, зависящей прямо пропорционально от  $N_0$  и обратно пропорционально от  $k_{KP}$ . Причем, эта погрешность, начиная с первых шагов, быстро возрастает и при  $k \geq 10$  стабилизируется (при отсутствии ошибок в алгоритме расчета).

На рис. 3.12 показано изменение погрешности левой части условий (3.25) и (3.32) в % от значения правой части при  $N_0 = 8$  и  $k_{KP} = 70$  по неявной и смешанной схемам в зависимости от  $k$ . Погрешность алгоритма расчета по неявной схеме составляет 2,3 %, по смешанной – 1,5 %. Рассматриваемая погрешность может изменяться в довольно широком диапазоне.

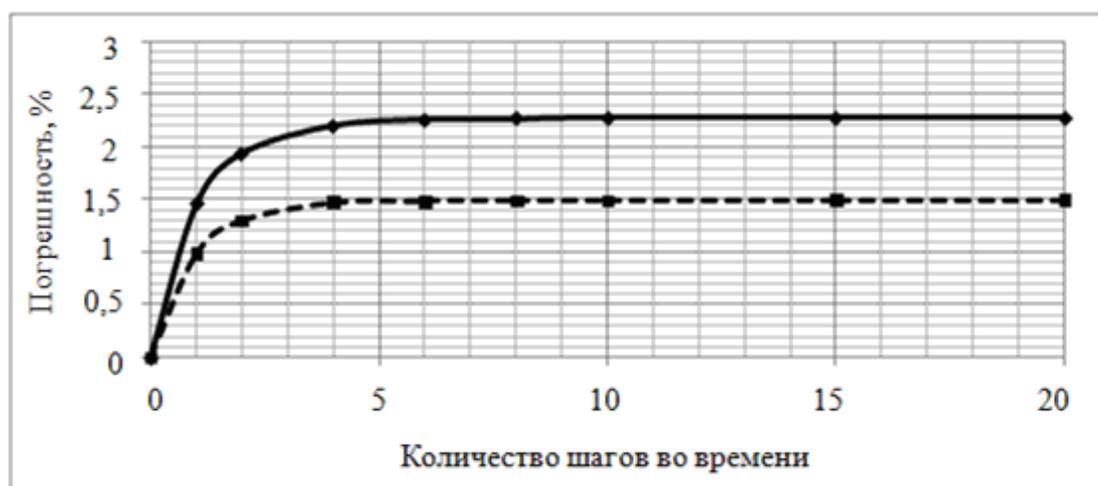


Рис. 3.12. Зависимость погрешности алгоритма расчета от номера шага  $k$ : маркер ромб – неявная схема; маркер квадрат – схема Кранка-Николсона.

Результаты расчетов по неявной и смешанной схемам могут содержать большую погрешность в области неустойчивости явной схемы и удаляться от аналитического решения (рис. 3.8-в, 3.9-в, 3.10-в и 3.13)



Рис. 3.13. Зависимость  $C_{MAX}$  от  $N_0$  при  $k_{KP}=150$ : точечная линия с маркером круг – явная схема, сплошная линия без маркера – схема Кранка-Николсона, осевая линия – ожидаемое аналитическое решение.

Из рис. 3.13 видно, что решение по явной схеме при  $N_0$  от 8 до 14 практически сливается с осевой линией (с ожидаемым аналитическим решением). Значение  $N_0$  равное 14 в данном случае является пределом устойчивости явной схемы ( $a + f = 0,485$ ). При  $N_0 \geq 15$  эта схема неустойчива ( $a + f > 0,5$ ). Смешанная схема Кранка-Николсона при  $N_0 \geq 15$  устойчива, однако решение по ней на пределе устойчивости ( $N_0 = 14$ ) и в области неустойчивости ( $N_0 \geq 15$ ) явной схемы уже меньше, чем ожидаемое аналитическое решение. С увеличением  $N_0$  решение по смешанной схеме удаляется от ожидаемого аналитического решения. Аналогичный результат наблюдается и по неявной схеме.

На рис. 3.8-в, 3.9-в и 3.10-в видно, что в области неустойчивости явной схемы ( $k_{KP} < 75$ ) результат эксперимента по неявной или смешанной схеме может содержать достаточно большую погрешность.

Таким образом, область численного эксперимента по конечно-

разностным схемам при исследовании турбулентной диффузии ВВ на небольших интервалах времени желательно ограничить условием  $a + f < 0,5$ . Это ограничение делает ненужным главное преимущество неявной и смешанной схем, которое заключается в абсолютной устойчивости решений по ним. Таким образом, численное моделирование распространения ВВ при залповых сбросах более предпочтительно выполнять с использованием явных конечно-разностных схем. В пользу явных схем склоняются также авторы [180–183].

Однако постановка численного эксперимента по явной схеме при исследовании диффузии ВВ на больших интервалах времени может оказаться весьма затруднительной из-за ограничения шага во времени для обеспечения устойчивости схемы, что может повлечь чрезмерно большое количество расчетов. Тогда более предпочтительными могут оказаться неявная или смешанная схемы. В этом случае необходимо выполнить исследования по оценке погрешности расчетов для рассматриваемых условий.

Оптимизацию параметров модели в пространственной постановке задачи выполним по явной схеме [177, 179].

Поиск необходимого минимума  $M_0$  в пространственной постановке задачи выполнен при следующих условиях:

- исходное количество слоев по глубине  $M_0$  принято равным 1;
- исходное количество колец в пятне взвеси  $N_0 = 1$ ;
- расчет выполняется по формулам (3.59)-(3.61), где параметр  $a_1 = a_2 = const = 0,125$ ;
- из выражений (3.67) видно, что условие  $a_1 = a_2 = const$  будет выполнено, если с уменьшением  $\Delta r = \Delta y$  (увеличении  $M_0$  и  $N_0$ ) в  $l$  раз параметры  $k_{KP}$  и  $f$  будут изменяться следующим образом:

$$k_{KP} \sim l^2 \quad \text{и} \quad f \sim 1/l;$$

- при выполнении всех расчетов должно выполняться условие устойчивости

схемы:

$$f < a_2.$$

Необходимый минимум  $M_0$  для пространственной постановки задачи найден в следующей последовательности:

- задано исходное количество шагов во времени  $\Delta t$  на КР (принято равным 10);
- при заданном значении  $f$  определена  $C_{MAX}$  в 10-й момент времени;
- далее при  $M_0 = 2$  ( $N_0 = 2$ , соответствующем  $M_0$ ) и параметре  $f$ , сниженном в 4 раза, смоделирован процесс, и на 40 шаге (количество шагов по сравнению с предыдущим расчетом увеличено в 4 раза) найдено новое значение  $C_{MAX}$ ;
- расчеты выполнены при  $M_0 = 1 \div 5$  ( $N_0 = 1 \div 5$ ) и  $f = 0,0 \div 0,1$ . Расчеты помещены в табл. 3.5 и на рис. 3.14.

Таблица 3.5

**Значения  $C_{MAX}$  на КР (в пространстве)**

$M_0$	$k_{KR}$	$f = 0,0$ (при $M_0 = 1$ )	$f = 0,1$ (при $M_0 = 1$ )
		$C_{MAX}, \%$	$C_{MAX}, \%$
1	10	18,17	1,562
2	40	18,12	1,786
3	90	18,12	1,837
4	160	18,12	1,856
5	250	18,13	1,865

Из рис. 3.14-а видно, что значение максимальной концентрации ( $C_{MAX}$ ) на КР при  $f = 0$ , как и следовало ожидать, не зависит от количества слоев по глубине. При  $f = 0,1$  значение  $C_{MAX}$  возрастает до  $M_0 = 3-4$ , после чего стабилизируется и практически не изменяется, поэтому дальнейший поиск оптимальных параметров модели можно начать с  $M_0 = 3$ .

а)



б)

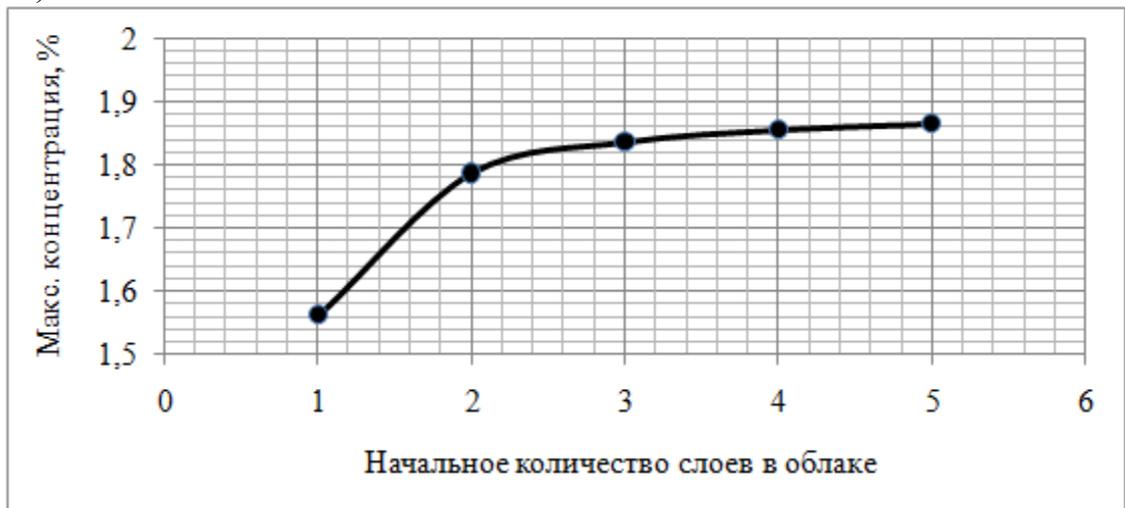


Рис. 3.14. Значения  $C_{MAX}$  по явной схеме в зависимости от  $M_0$ : а)  $f=0$ ; б)  $f=0,1$  (значение  $f > 0$  дано при  $M_0=1$ ).

Результаты последующих расчетов по оптимизации параметров пространственной модели приведены в табл. 3.6, 3.7 и на рис. 3.15-3.17. В табл. 3.6 расчет выполнен при  $N_0=4$ , а в табл. 3.7 – при  $N_0=6$ .

По результатам выполненных расчетов [177, 179] видно, что для получения оценки с малой (порядка 4-5%) погрешностью в пространственной постановке задачи необходимо разбить облако повышенной мутности в начальный момент времени не менее чем на 3 кольца по горизонтали и не менее чем на 6-8 слоев по глубине, при этом количество шагов на КР должно быть примерно равным 50-60.

Значения  $C_{MAX}$  на КР (в пространстве) при  $N_0=4$ 

$a_1$	$a_2$	$k_{KP}$	$M_0$	$C_{MAX}$ при различных $u$ (см/с)		
				0,00	0,320	1,38
0,408	0,0143	75	3	12,156	10,141	–
0,408	0,0255		4	12,156	10,339	–
0,408	0,0574		6	12,156	10,495	–
0,408	0,0781		7	12,156	10,530	–
<b>0,408</b>	<b>0,1020</b>		8	12,156	<b>10,493</b>	–
0,306	0,0108	100	3	12,191	10,180	–
0,306	0,0191		4	12,191	10,378	–
0,306	0,0430		6	12,191	10,534	–
0,306	0,0765		8	12,191	10,591	0,377
0,306	0,1195		10	12,191	10,618	0,381
0,245	0,0086	125	3	12,212	10,203	–
0,245	0,0153		4	12,212	10,401	–
0,245	0,0344		6	12,212	10,557	–
0,245	0,0612		8	12,212	10,614	0,402
0,245	0,0956		10	12,212	10,641	0,405
0,204	0,0072	150	3	12,227	10,218	–
0,204	0,0127		4	12,227	10,416	–
0,204	0,0287		6	12,227	10,572	–
0,204	0,0510		8	12,227	10,630	0,420
0,204	0,0797		10	12,227	10,657	0,422
0,175	0,0061	175	3	12,237	10,230	–
0,175	0,0109		4	12,237	10,428	–
0,175	0,0246		6	12,237	10,583	–
0,175	0,0437		8	12,237	10,641	0,433
0,175	0,0683		10	12,237	10,668	0,434
0,153	0,0054	200	3	12,245	10,238	–
0,153	0,0096		4	12,245	10,436	–
0,153	0,0215		6	12,245	10,592	–
0,153	0,0382		8	12,245	10,649	0,442
0,153	0,0598		10	12,245	10,676	0,443

Примечание: В табл. 3.6 прочерки поставлены при  $f \geq a_2$

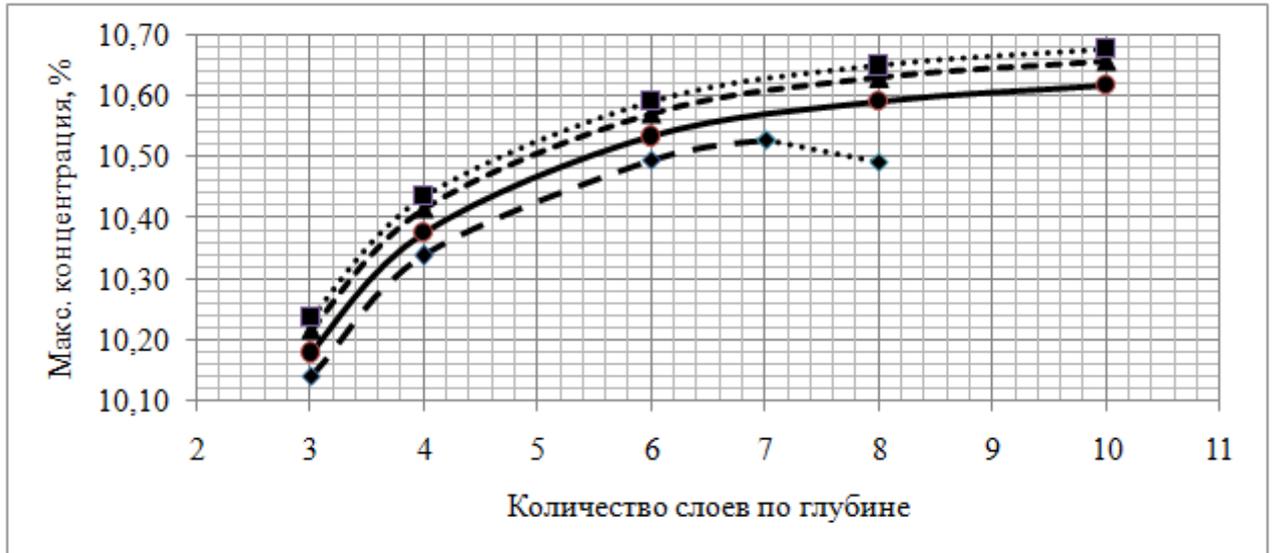


Рис. 3.15. Значения  $C_{MAX}$  по явной схеме в зависимости от  $M_0$  и  $k_{KP}$  ( $N_0 = 4$ ,  $u = 0,32$  см/с): маркер ромб –  $k_{KP} = 75$ ; маркер круг –  $k_{KP} = 100$ ; маркер треугольник –  $k_{KP} = 150$ ; маркер квадрат –  $k_{KP} = 200$ .

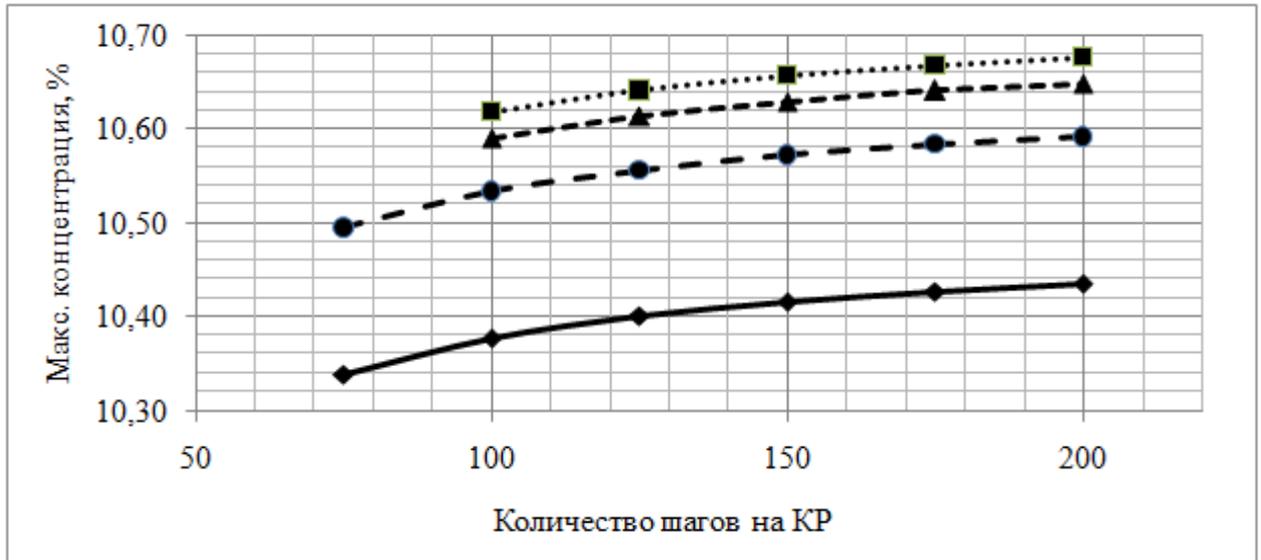


Рис. 3.16. Значения  $C_{MAX}$  по явной схеме в зависимости от  $k_{KP}$  и  $M_0$  ( $N_0 = 4$ ,  $u = 0,32$  см/с): маркер ромб –  $M_0 = 4$ ; маркер круг –  $M_0 = 6$ ; маркер треугольник –  $M_0 = 8$ ; маркер квадрат –  $M_0 = 10$ .

Значения  $C_{MAX}$  на КР (в пространстве) при  $N_0 = 6$ 

$a_1$	$a_2$	$k_{KP}$	$M_0$	$C_{MAX}$
0,459	0,007	150	3	10,199
0,459	0,013		4	10,396
0,459	0,029		6	10,552
<b>0,459</b>	<b>0,051</b>		8	<b>11,718</b>
0,393	0,006	175	3	10,210
0,393	0,011		4	10,407
0,393	0,025		6	10,563
0,393	0,044		8	10,620
0,393	0,068		10	10,647
0,344	0,005	200	3	10,218
0,344	0,010		4	10,416
0,344	0,022		6	10,571
0,344	0,038		8	10,629
0,344	0,060		10	10,656

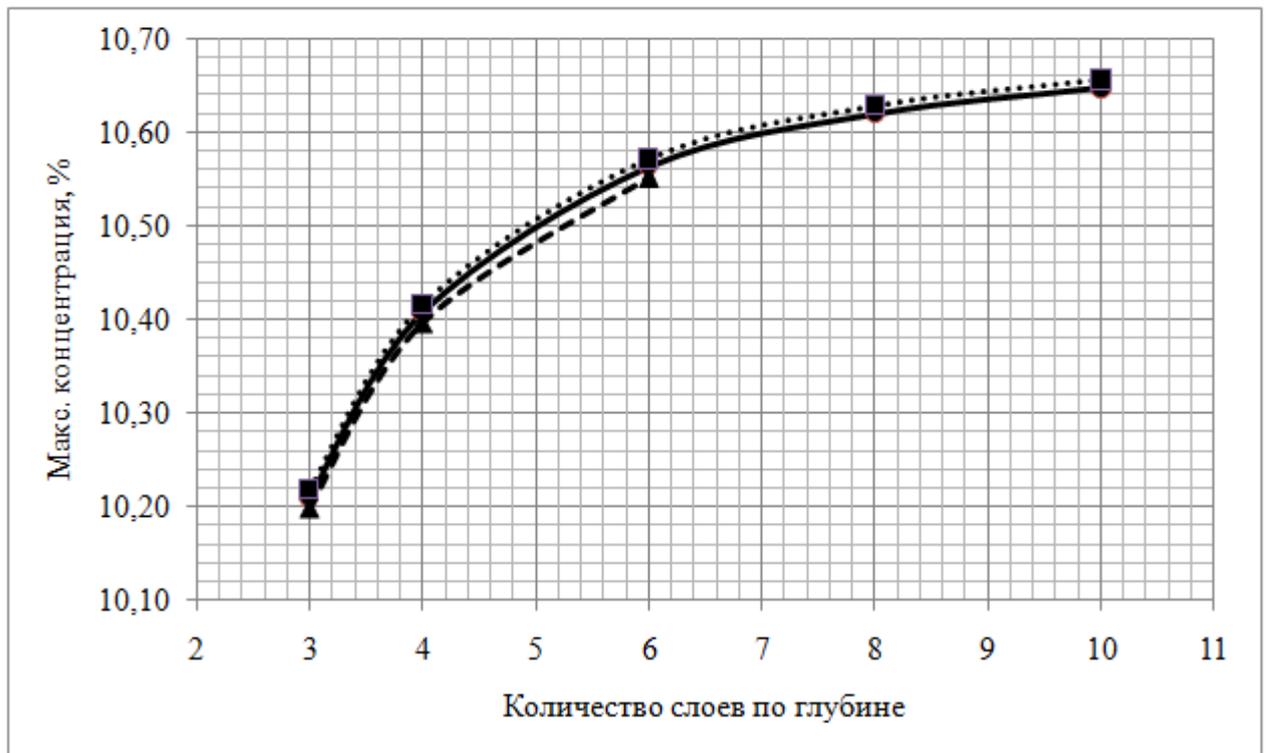


Рис. 3.17. Значения  $C_{MAX}$  по явной схеме в зависимости от  $k_{KP}$  и  $M_0$  ( $N_0 = 6$ ,  $u = 0,32$  см/с): маркер треугольник —  $k_{KP} = 150$ ; маркер круг —  $k_{KP} = 175$ ; маркер квадрат —  $k_{KP} = 200$ .

### 3.5. Сопоставление результатов моделирования с расчетами по фундаментальным решениям

Для двумерного уравнения горизонтальной турбулентной диффузии в условиях устойчивой стратификации морских вод фундаментальное решение распространения примеси с нейтральной плавучестью имеет вид [184]

$$C(x, y, t) = Q/(4\pi D_T t) \exp[-(x^2 + y^2)/(4 D_T t)], \quad (3.69)$$

где  $Q$  – мощность точечного источника, условные единицы;

$D_T$  – горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$t$  – время, с.

Из формулы (3.69) видно, что максимальное значение концентрации примеси убывает пропорционально времени,  $C(0, 0, t) \sim t^{-1}$

$$C(0, 0, t) = Q/(4\pi D_T t). \quad (3.70)$$

При сравнении результатов численного моделирования учтено, что начальный момент времени  $t = 0$  по формуле (3.70) не совпадает с начальным моментом времени  $k = 0$  по конечно-разностной схеме, поскольку при  $t \rightarrow 0$  значение  $C(0, 0, t) \rightarrow \infty$ .

Для сопоставимости результатов необходим сдвиг по времени  $t_0$ . А. А. Гончаров [28] в формуле (1.4) расчета распространения ВВ в морской среде после сброса грунта также использует сдвиг по времени  $t^*$ . По определению автора [28] – это «поправка к реальному времени», учитывающая эффект динамического расширения пятна взвеси при точечной аппроксимации источника. Примем его равным шагу  $\Delta t = r_0^2/(4D_T)$  в конечно-разностной схеме, что соответствует  $a = 0,25$ .

Если теперь задаться значением  $C(0, 0, t_0)$ , то обратным расчетом по (3.70) можно найти соответствующую ему мощность точечного источника  $Q = 4\pi D_T \Delta t C(0, 0, t_0)$ . Далее, используя полученную  $Q$ , для моментов времени  $k$  по формуле (3.70) представляется возможным рассчитать значения максимальной концентрации. Время для расчета по формуле (3.70), соответствующее моменту  $k$  в конечно-разностной схеме, будет равно  $t = (k+1)\Delta t$ .

В табл. 3.8 и на рис. 3.18 представлены результаты расчета при мощности источника 10000 условных единиц и параметрах модели –  $N_0 = 1$ ;  $u = 0$ ;  $r_0 = 5,64$  м;  $\Delta t = 416$  с;  $D_T = 0,0191$  м<sup>2</sup>/с;  $H = 20$  м;  $C_0 = 100$ .

Таблица 3.8

**Значения  $C_{MAX}$  в различные моменты времени (в двумерной задаче)**

$k$	$t, c$	$C_{MAX}$				Отклонение от аналитического решения, %		
		Фундаментальное решение	Явная схема	Кранка-Николсона	Неявная схема	Явная схема	Кранка-Николсона	Неявная схема
0	416	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00
2	1249	33,33	33,33	42,20	49,82	0,00	26,6	49,4
4	2082	20,00	20,00	23,85	28,83	0,00	19,2	44,1
6	2915	14,29	14,29	16,12	18,95	0,00	12,8	32,7
8	3747	11,11	11,11	12,07	13,72	0,00	8,64	23,5
10	4580	9,091	9,091	9,622	10,64	0,00	5,84	17,0
20	8744	4,762	4,762	4,743	4,902	0,00	-0,40	2,94
30	12907	3,226	3,226	3,139	3,169	0,00	-2,68	-1,78
40	17071	2,439	2,439	2,345	2,338	0,00	-3,87	-4,13
50	21235	1,961	1,961	1,871	1,852	0,00	-4,59	-5,53
60	25398	1,639	1,639	1,556	1,533	0,00	-5,08	-6,47
80	33726	1,235	1,235	1,164	1,140	0,00	-5,70	-7,64
100	42053	0,9901	0,9901	0,9300	0,9075	0,00	-6,07	-8,34

Из табл. 3.8 видно, что результаты моделирования по явной схеме совпадают с расчетами по аналитической формуле. Расчеты по неявной и Кранка-Николсона схемам дают удовлетворительные результаты после 15 – 20 шагов во времени.

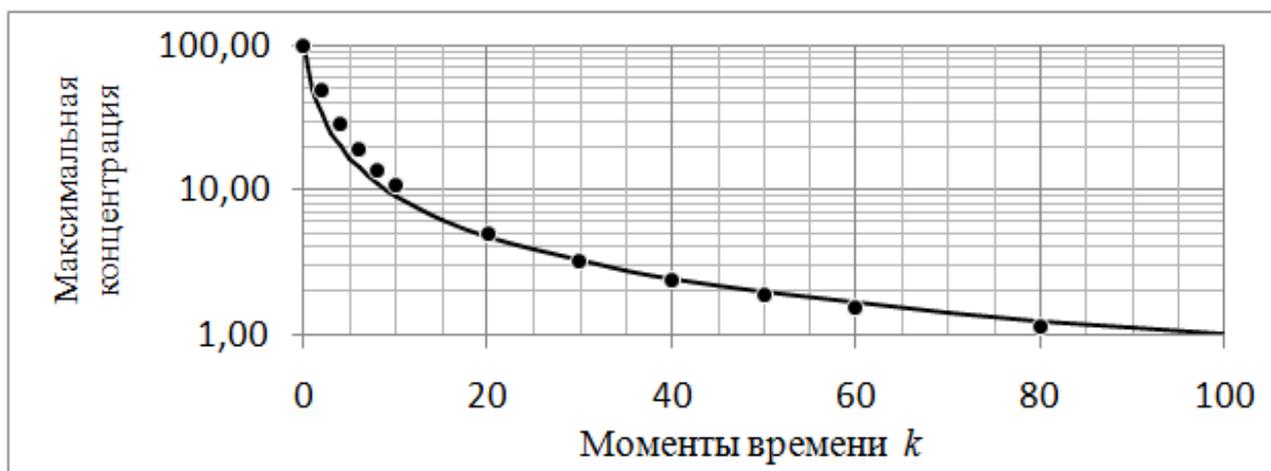


Рис. 3.18. Изменение максимальной концентрации примеси во времени (двумерная задача): сплошная линия – расчет по аналитической формуле и результаты эксперимента по явной схеме; маркер круг – численный эксперимент по неявной схеме.

Рассмотрим теперь трехмерную диффузию. Фундаментальное решение для неограниченного пространства имеет вид [184]

$$C(x, y, z, t) = Q/[8(\pi D_B t)^{3/2}] \exp[-(x^2 + y^2 + z^2)/(4 D_B t)], \quad (3.71)$$

где  $D_B$  – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Из (3.71) видно, что максимальное значение концентрации примеси уменьшается пропорционально времени в степени «3/2»

$$C(0, 0, 0, t) = Q/[8(\pi D_B t)^{3/2}]. \quad (3.72)$$

При сопоставлении расчетов по тем же причинам, что и в плоской

постановке задачи, введем сдвиг по времени  $t_0$ . Наилучшая сходимость результатов расчетов наблюдается при:  $t_0 = r_0 r_C / (4D_B)$ , где  $r_C$  – радиус полушария с объемом, равным объему цилиндра, у которого радиус основания  $r_0$  равен его высоте  $\Delta z$ ;  $\Delta t = r_0^2 / (8D_B)$ , что соответствует  $a_1 = a_2 = 0,125$ .

Для фундаментальной формулы время, соответствующее моменту  $k$  в конечно-разностной схеме, будет равно  $t = t_0 + k\Delta t$ .

В табл. 3.9 и на рис. 3.19 помещены результаты сопоставительных расчетов при мощности источника 85182 условные единицы и параметрах модели –  $N_0 = 1$ ;  $M_0 = 1$ ;  $u = 0$ ;  $r_0 = 5,0$  м;  $\Delta z = 5,0$  м;  $r_C = 5,72$  м;  $t_0 = 337,6$  с;  $\Delta t = 147,5$  с;  $D_B = 0,0212$  м<sup>2</sup>/с;  $H = 300$  м;  $C_0 = 100$ .

Из табл. 3.9 и рис. 3.19 видно, что отклонение результатов расчетов и эксперимента отличаются в допустимых пределах.

Таблица 3.9

**Значения  $C_{MAX}$  в различные моменты времени (в трехмерной задаче)**

$k$	$t, c$	$C_{MAX}$		Погрешность, %
		Фундаментальное решение	Явная схема	
0	337,6	100,0	100,0	0,00
2	632,6	38,99	42,71	9,53
4	927,6	21,962	23,662	7,74
6	1222,5	14,515	15,212	4,80
8	1517,5	10,496	10,752	2,44
10	1812,5	8,041	8,098	0,71
20	3287,3	3,292	3,184	-3,29
30	4762,1	1,8880	1,7983	-4,75
40	6236,9	1,2596	1,1903	-5,51
50	7711,7	0,9162	0,8615	-5,97
60	9186,5	0,7046	0,6604	-6,28
80	12136,1	0,4641	0,4331	-6,67
100	15085,7	0,3348	0,3117	-6,90

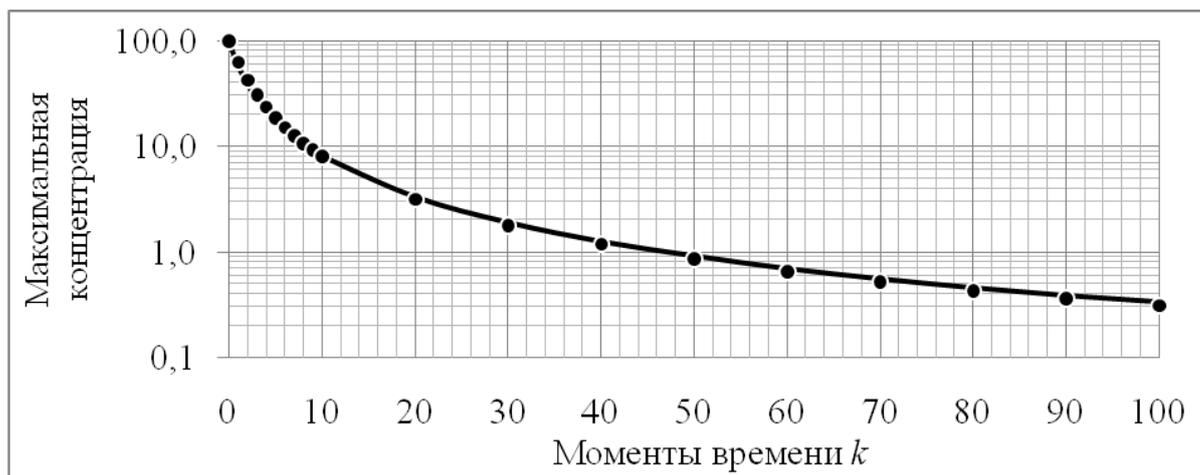


Рис. 3.19. Изменение максимальной концентрации примеси во времени (трехмерная задача): сплошная линия – расчет по аналитической формуле; маркер круг – численный эксперимент по явной схеме.

Необходимо отметить, что наименьшее отклонение результатов моделирования от расчетов по аналитической формуле в трехмерной задаче наблюдается в тех случаях, когда  $a_1 > a_2$  и  $(a_1 + a_2) \approx 0,45$ , т.е. при значениях параметров  $a_1$  и  $a_2$  очень близких к пределу устойчивости явной схемы.

### 3.6. Сопоставление с натурными данными

При сопоставлении результатов численного эксперимента с данными натурных исследований были использованы данные наблюдений, проведенных в районе свалки грунта у о. Экви в Финском заливе в сентябре 1983 г. [10]. Привлекательность этих наблюдений обусловлена тем, что исследователями было зафиксировано возникновение вторичных пиков содержания ВВ в верхних слоях водной толщи. Сопоставление

данных позволило не только верифицировать модель, но и продемонстрировать ее возможности.

Наблюдения проводились на отвале с глубиной 90 м. Толща воды была стратифицирована, глубина ВКС составляла примерно 25 м. Сброс выполнялся самоотвозным землесосом. Пробы на ВВ отбирались в центре дрейфующего пятна взвеси в средней части ВКС (горизонт 10 м). Полученные в результате эксперимента данные о концентрации некоторых фракций ВВ представлены на рис. 3.20.

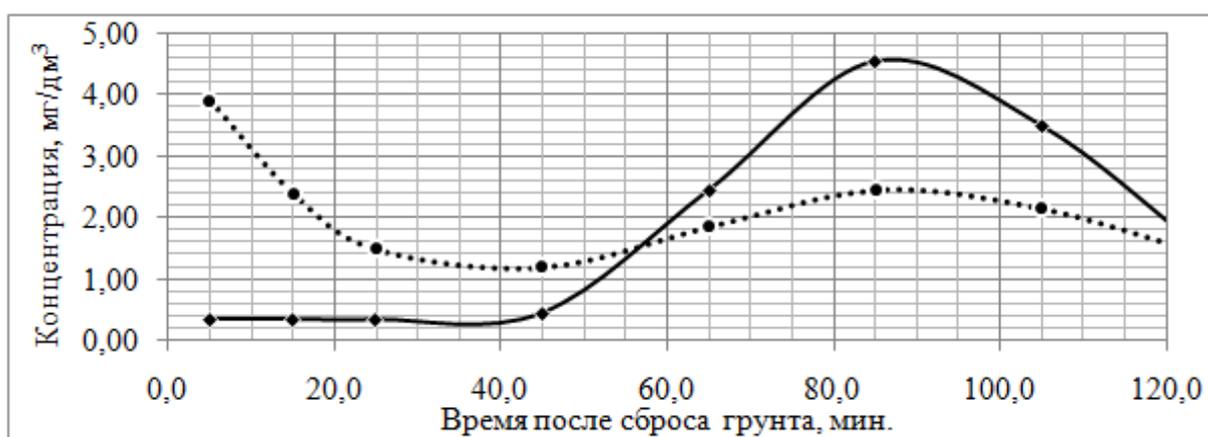


Рис. 3.20. Изменение концентрации фракций ВВ А (0,025-0,05 мм – сплошная линия) и Б (0,05-0,1 мм – точечная линия) во времени на горизонте 10 м по результатам наблюдений [10].

На рис. 3.20 показано, что на горизонте 10 м заметен вторичный пик содержания фракций ВВ А и Б. Это привело к увеличению общего содержания ВВ в верхнем слое. Данное явление, по мнению авторов [10], может быть связано: во-первых, с разрушением нестабильных агрегатов, состоящих из мелких частиц (в основном фракции А), такие агрегаты могли образоваться в процессе консолидирования донных отложений в месте забора грунта; во-вторых, с процессами выноса ВВ вверх из нижних несущих слоев (термоклина и придонного).

Предлагаемая методика позволяет смоделировать возникновение вторичных пиков содержания ВВ в верхних слоях за счет ее турбулентной

диффузии из нижних слоев [167, 185].

В табл. 3.10 приведены значения концентрации фракции ВВ Б (0,05-0,10 мм) с гидравлической крупностью  $u=0,32$  см/с на горизонте 10 м в различные моменты времени на различном расстоянии от центра облака (скорость течения – 0,1 м/с, коэффициент Шези –  $50 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ ).

Таблица 3.10

**Распределение фракции ВВ ( $u=0,32$  см/с) в облаке повышенной мутности на глубине 10 м в различные моменты времени после сброса**

Время после сброса, мин.	Концентрация фракции ВВ Б ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ ) на различном удалении (м) от центра облака повышенной мутности									
	1,0	9,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	23,0	25,0	27,0
0,0	5,00	5,00	5,00	5,00	<b>5,00</b>	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,3	5,00	5,00	4,93	4,67	4,02	<b>2,95</b>	1,74	0,77	0,24	0,05
16,7	5,01	4,96	4,63	4,20	3,54	2,72	<b>1,85</b>	1,10	0,56	0,24
25,0	5,09	4,92	4,42	3,95	3,33	2,63	1,91	<b>1,27</b>	0,76	0,41
33,3	5,22	4,91	4,30	3,82	3,24	2,61	1,98	1,40	<b>0,92</b>	0,56
41,7	5,33	4,89	4,22	3,75	3,20	2,61	2,03	1,50	<b>1,04</b>	0,68
50,0	5,39	4,86	4,16	3,69	3,17	2,62	2,08	1,58	<b>1,15</b>	0,79
58,3	5,40	4,80	4,09	3,64	3,14	2,63	2,12	1,65	<b>1,23</b>	0,88
66,7	5,36	4,73	4,02	3,58	3,11	2,63	2,15	<b>1,70</b>	1,30	0,95
75,0	5,29	4,64	3,95	3,53	3,08	2,62	<b>2,16</b>	1,74	1,35	1,02
83,3	5,19	4,55	3,87	3,46	3,04	<b>2,60</b>	2,17	1,76	1,40	1,07
91,7	5,08	4,44	3,78	3,40	2,99	<b>2,58</b>	2,17	1,78	1,43	1,12
100,0	4,95	4,33	3,70	3,33	2,95	2,55	<b>2,16</b>	1,80	1,46	1,15
108,3	4,82	4,22	3,62	3,27	2,90	2,52	2,16	<b>1,80</b>	1,48	1,18
116,7	4,69	4,11	3,53	3,20	2,85	2,49	2,14	1,80	<b>1,49</b>	1,21
125,0	4,55	4,00	3,45	3,13	2,80	2,46	2,12	1,80	1,50	<b>1,23</b>

Вторичный пик представилось возможным смоделировать при условии, что сразу после сброса концентрация рассматриваемой фракции ВВ в нижних слоях значительно больше ( $20 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ), чем в верхних ( $5 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ).

На рис. 3.21, построенном по табл. 3.10, показано, что на глубине 10 м вторичный пик наблюдается в центре облака повышенной мутности. При этом

временной ход значений концентрации ВВ не соответствует ходу, зафиксированному при отборах проб (рис. 3.21).

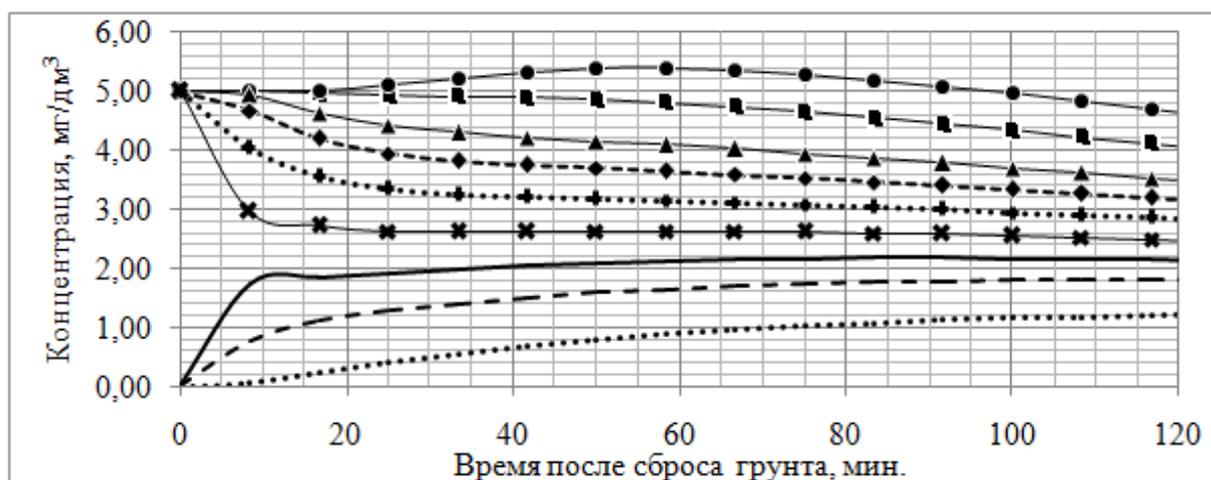


Рис. 3.21. Значения концентрации фракции ВВ ( $u = 0,32$  см/с) на глубине 10 м в различные моменты времени на различном удалении от центра облака повышенной мутности: маркер круг – в центре; квадрат – 9 м от центра; треугольник – 13 м; ромб – 15 м; плюс – 17 м; крестик – 19 м; сплошная линия без маркера – 21 м; пунктирная – 23 м; точечная – 27 м.

При попытке сопоставления натуральных данных с расчетом необходимо учитывать, что дрейф облака повышенной мутности и судна, с которого выполняются наблюдения, чаще всего не совпадает (судно в большей степени дрейфует под воздействием ветра, тогда как облако взвеси движется строго по течению). Кроме того, положение судна относительно облака оценивается визуально. Оба фактора приводят к тому, что при натурном эксперименте отбор проб в облаке взвеси осуществляется на различном расстоянии от его центра.

Принимая во внимание сказанное, можно составить множество вариантов «отбора проб» в табл. 3.10. На рис. 3.22 представлен один из возможных вариантов (в табл. 3.10 значения, использованные при построении графика, выделены полужирным шрифтом), где видно, что хронологический ход рассчитанных значений концентрации фракции ВВ удовлетворительно совпадает с натурными данными.

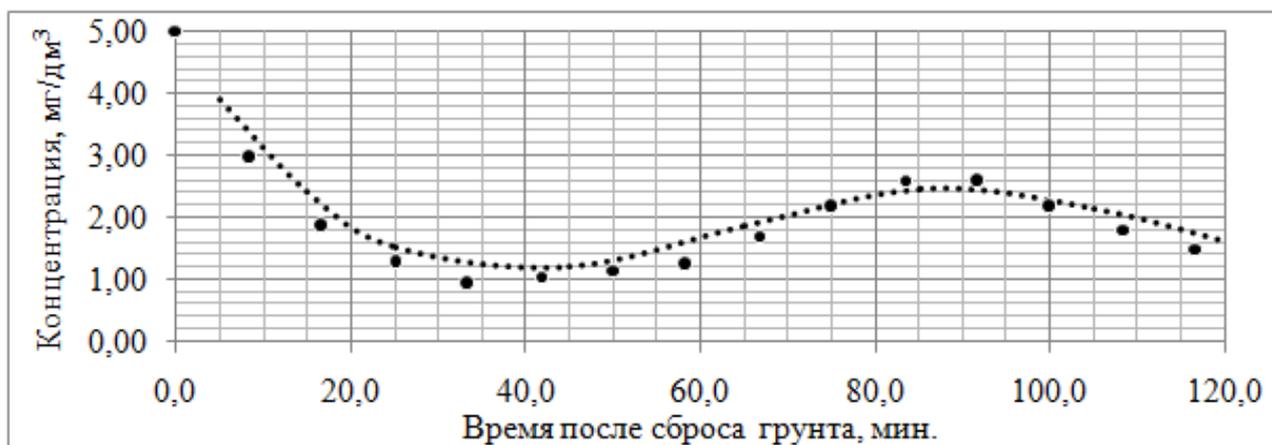


Рис. 3.22. Вариант изменения концентрации фракций ВВ на глубине 10 м при «отборе проб» на различном удалении от центра облака повышенной мутности: точечная линия – результаты наблюдений; маркер круг – численный эксперимент на пространственной модели.

На рис. 3.23 представлена зависимость максимального значения концентрации ВВ во вторичном пике в центре облака повышенной мутности от гидравлической крупности частиц.

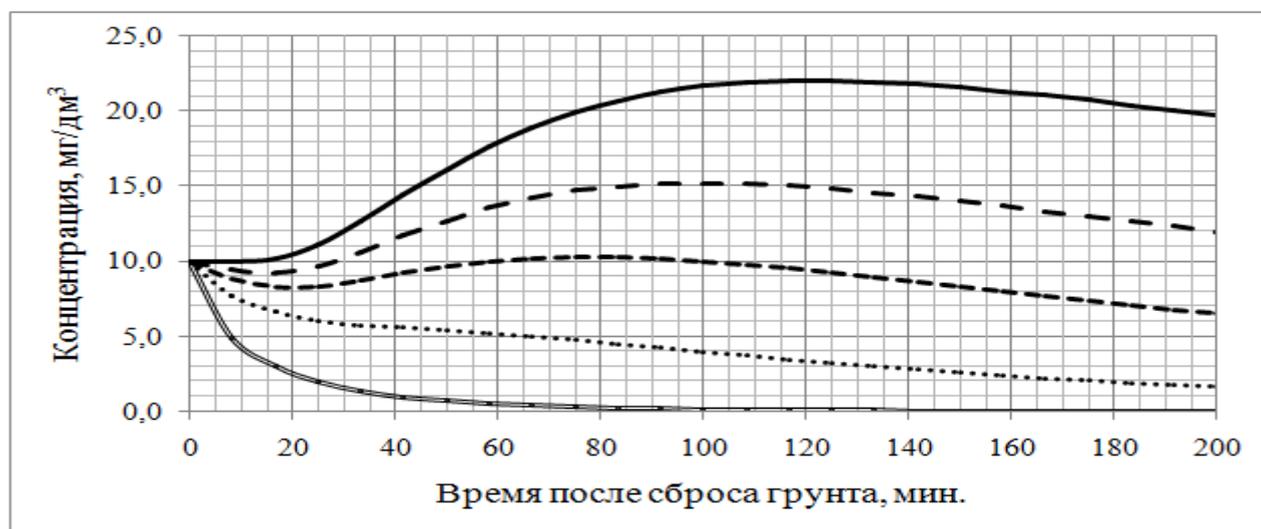


Рис. 3.23. Изменение максимальной концентрации ВВ в поверхностном слое в зависимости от его гидравлической крупности: сплошная верхняя линия –  $u = 0,005$  см/с; мелкий пунктир –  $u = 0,05$  см/с; пунктир –  $u = 0,10$  см/с; точечная –  $u = 0,20$  см/с; двойная нижняя –  $u = 0,50$  см/с.

Из рис. 3.23 видно, что для мелких фракций ВВ пиковое значение их концентрации может в два и более раза превышать начальное значение. Кратность превышения в значительной степени зависит от гидравлической крупности частиц и от того, во сколько раз концентрация фракции в нижних слоях больше, чем в верхних.

Рассмотрим данные наблюдений в районе отвала грунтов ГСХ Дунай – Черное море, проведенных весной 1998 г. [186].

Во время специальных инструментальных наблюдений были определены фоновые концентрации ВВ в море, затем произведены замеры во время процесса сброса грунта и через 20 минут после сброса. Толща воды стратифицирована, верхний слой – 5 м.

До сброса фоновая концентрация ВВ на поверхности моря была и **5,6** мг/дм<sup>3</sup>, волнение – штиль. Сброс грунта производился в течение 10-15 минут на циркуляции землесоса «Черное море» вокруг буя со скоростью 2 узла (5,7 км/час). С учетом безопасности мореплавания, были выполнены измерения в «момент сброса» грунта в кильватерной струе судна. Концентрация ВВ на поверхности повысилась до **11,1** мг/дм<sup>3</sup>. Скорость течения на поверхности моря составляла 11 см/с, направление 230°. Через двадцать минут после прекращения сброса произведены дополнительные замеры в 1 кабельтове от места сброса, с учетом преобладающего вектора скорости течения. При этом, на поверхности моря концентрация ВВ стала равной **8,0** мг/дм<sup>3</sup>, т.е. снизилась в 1,4 раза. Исходная концентрация, сбрасываемой из трюмов пульпы, составляла около **543** г/дм<sup>3</sup>.

Площадь пятна взвеси за 15 минут сброса, учитывая площадь днищевой двери (150 м<sup>2</sup>), составит примерно  $12,2 * 5,7 * 1000 / 60 / 60 * 15 * 60 = 17390$  м<sup>2</sup>. Радиус эквивалентного круга равен 74,4 м. Осадка судна в грузу – 6,2 м. Таким образом, сброс выполнен за пределы верхнего слоя моря (ниже корпуса судна). В пределах верхнего слоя моря превышение концентрации ВВ над фоном в облаке взмучивания составило 5,5 мг/дм<sup>3</sup>. Гранулометрический состав представлен в табл. 3.11.

Таблица 3.11

**Гранулометрический состав грунтов дноуглубления ГСХ [186]**

	Содержание фракций грунта, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5- 0,25 мм	0,25- 0,10 мм	0,10- 0,05 мм	0,05- 0,01 мм	0,01- 0,005 мм	менее 0,005 мм	
Сред.	1,23	22,31	16,17	9,33	17,03	15,49	16,98	1,41
<i>u</i> , см/с	9,59	4,42	1,38	0,32	0,05	0,003	0,0003	-

Остальные исходные данные и промежуточные расчеты: коэффициент Шези – 50; КР – 185 м; начальное количество колец в пятне – 10; шаг во времени – 20 с; шаг по вертикали – 0,36 м; толщина облака взвеси в пределах верхнего слоя моря 5 м (количество слоев по толщине облака – 14); количество интервалов времени до КР – 84. При введении этих данных в модуль «Дампинг-взвесь» максимальное значение концентрации полидисперсного ВВ в превышении над фоном на расстоянии 1 кабельтов от места сброса составит 2,9 мг/дм<sup>3</sup>. С учетом фона значение концентрации будет равно – 2,9 + 5,6 = 8,5 мг/дм<sup>3</sup>. Измеренное значение составляет 8,0 мг/дм<sup>3</sup>. Отклонение расчетного значения от измеренного – 6,3 %.

Изменение значения  $C_{MAX}$  по мере удаления от ТС грунта представлено в табл. 3.12 и на рис. 3.24. Кроме того, разработанная модель позволяет оценить изменение  $C_{MAX}$  по глубине (табл. 3.13 и рис. 3.25) и распределение концентрации ВВ в пятне (рис. 3.26).

Таблица 3.12

**Изменение максимальной концентрации полидисперсного ВВ в облаке повышенной мутности в зависимости от расстояния**

<i>k</i>	Расстояние, м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	<i>k</i>	Расстояние, м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>
0	0	5,50	50	110	3,10
10	22	4,17	60	132	3,03
20	44	3,40	70	154	2,95
30	66	3,23	80	176	2,88
40	88	3,17	90	198	2,82

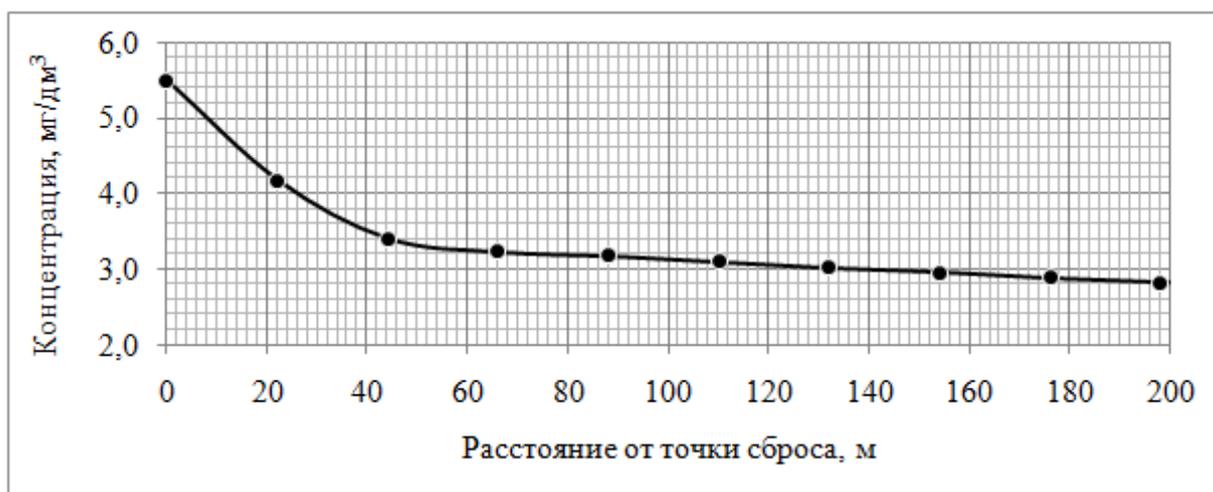


Рис. 3.24. Изменение максимальной концентрации полидисперсного ВВ в облаке повышенной мутности в зависимости от расстояния.

Таблица 3.13

Изменение  $C_{MAX}$  полидисперсного ВВ по глубине на расстоянии 185 м от ТС  
в пределах ВКС

$m$	Глубина, м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$m$	Глубина, м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>
1	0,2	2,4	8	2,7	2,7
2	0,5	2,4	9	3,0	2,7
3	0,9	2,5	10	3,4	2,8
4	1,3	2,5	11	3,8	2,8
5	1,6	2,6	12	4,1	2,8
6	2,0	2,6	13	4,5	2,8
7	2,3	2,7	14	4,8	2,9

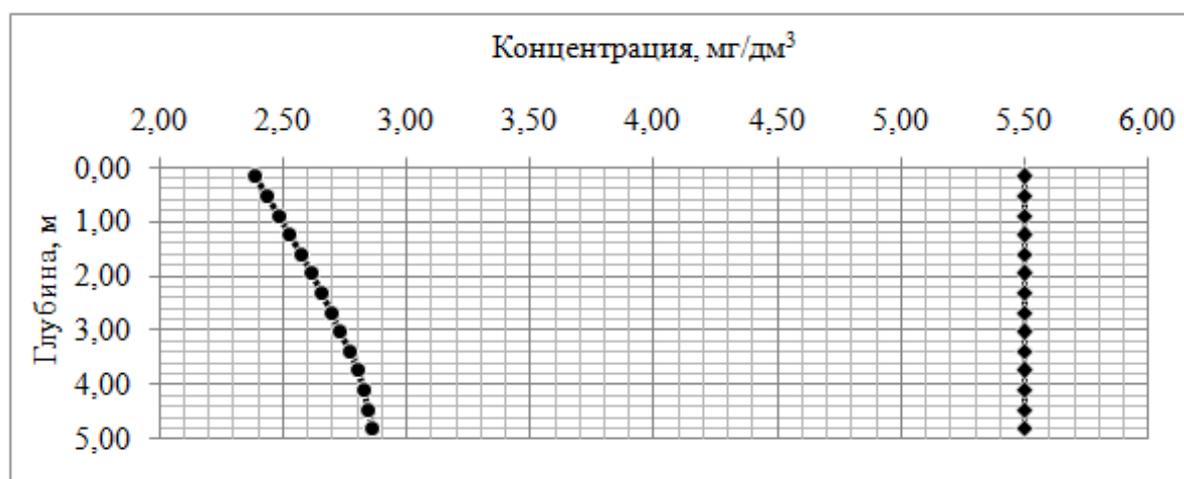


Рис. 3.25. Изменение  $C_{MAX}$  полидисперсного ВВ по глубине в пределах ВКС: маркер круг – на расстоянии 185 м; ромб – в ТС.

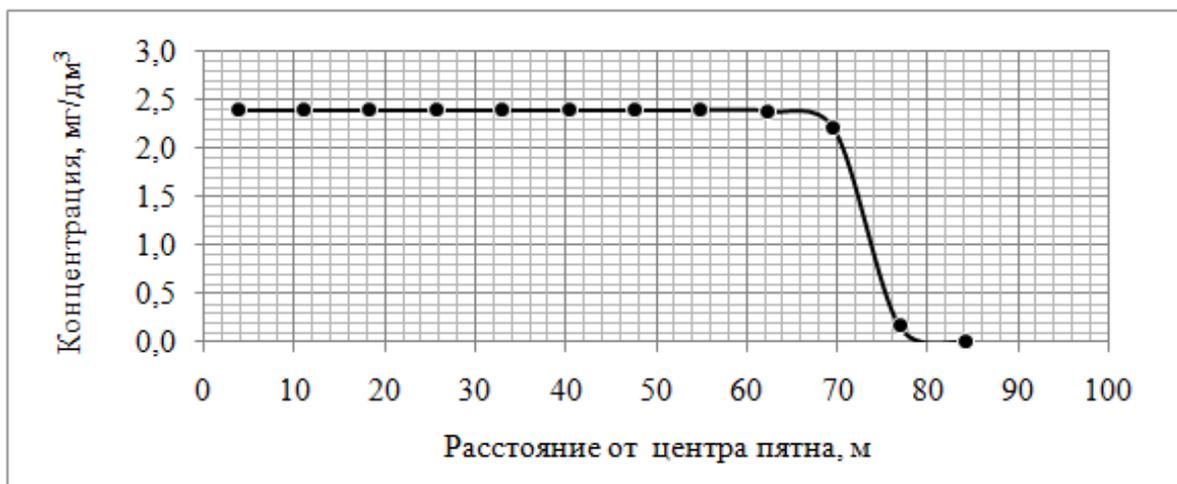


Рис. 3.26. Распределение концентрации ВВ в пятне на поверхности моря на расстоянии 185 м от ТС грунта.

### ***Выводы к разделу 3***

1. При моделировании турбулентной диффузии ВВ с использованием метода сеток на небольших интервалах времени наиболее предпочтительной является явная схема, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими схемами: решение по этой схеме имеет физический смысл; при отсутствии ошибок в алгоритме расчета значения правой и левой части проверочных условий (3.15) и (3.66) совпадают абсолютно.

2. Разработанная математическая модель и ее решение удовлетворительно отображают реальный процесс распространения полидисперсного ВВ после сброса грунта на морской подводный отвал и могут быть использованы при его исследовании в плоской и пространственной постановке задачи на небольшом удалении от ТС.

3. Полученный безразмерный параметр  $f$  позволяет учесть удаление частиц ВВ из водной среды за счет осаждения и вместе с коэффициентами Куранта задать условие устойчивости явной схемы.

4. Полученное решение в пространственной постановке позволяет исследовать распространение ВВ при более разнообразных начальных и граничных условиях, чем в плоской постановке:

- исследовать процесс вертикального обмена ВВ между слоями водной

толщи;

– учесть направление придонных и поверхностных течений;

– учесть исходную форму вертикального сечения облака повышенной мутности;

– учесть неравномерность содержания ВВ по глубине в ТС.

5. Полученные впервые выражения для проверки результатов численных экспериментов, выполняемых по явной (3.15), неявной (3.25) и смешанной (3.32) схемам при моделировании турбулентной диффузии ВВ в плоской и пространственной (3.66) постановке, позволяют в самом начале выполнения расчетов установить наличие или отсутствие ошибок в алгоритме расчета.

6. При моделировании процесса распространения ВВ погрешность оценки максимальной концентрации на КР составит порядка 4-5 % при сравнительно небольшом объеме расчетов, если разбить облако повышенной мутности в начальный момент времени примерно на 3 кольца по горизонтали; не менее чем на 6-8 слоев по глубине; количество шагов на КР должно быть примерно 50-70.

7. Сопоставление численных экспериментов по разработанной методике с результатами расчетов по фундаментальным решениям дает удовлетворительный результат при введении сдвига по времени  $t_0$ : в плоской постановке –  $t_0 = \Delta t = r_0^2 / (4D_T)$ ; в трехмерной задаче –  $t_0 = r_0 r_C / (4D_B)$  и  $\Delta t = r_0^2 / (8D_B)$ .

8. Отклонение результатов численного эксперимента по разработанной методике от данных натуральных наблюдений находится в допустимых пределах (не более 10-15 %) при исследовании распространения ВВ на небольшом удалении от ТС грунта, при слабом ветровом волнении и при малой скорости течения.

## РАЗДЕЛ 4

ОПТИМИЗАЦИЯ ДАМПИНГА ГРУНТОВ ДНОУГЛУБЛЕНИЯ НА  
УКРАИНСКОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ4.1. Методические рекомендации по оптимизации дампинга грунтов  
дноуглубления

Предлагаемая методика применяется для выбора оптимального места складирования грунтов дноуглубления.

Методика позволяет учесть необходимые и достаточные условия для осуществления дампинга грунтов, и оптимальным образом сочетает минимизацию воздействия на морскую среду и экономическую целесообразность проектируемой деятельности.

Исходные данные:

- гидрологическая структура вод;
- динамика вод;
- режим ветра и ветрового волнения с учетом сезонной изменчивости;
- характеристика рельефа дна, донных отложений, а так же мутность воды;
- гидро- и геохимические измерения;
- гидробиологические наблюдения.

На основании анализа интегральной схемы, полученной с помощью ГИС «Дампинг» (Приложение А), определяются наиболее благоприятные для дампинга дноуглубления районы расположения отвала (с максимальными значениями суммарного балла).

На основании результатов математического моделирования определяются значения концентраций ЗВ на КР и проверяется соблюдение рыбохозяйственных нормативов [82, 83].

Проверяется ограничение содержания фаз грунтов в соответствии с нормативным документом [81].

Используя формулы (1.21), (1.26), (1.34), (1.38) и (1.39), определяется целевая функция для поиска оптимального решения:

– если расстояние до перспективных точек по вариантам отличается незначительно, то поиск оптимального решения представляется возможным выполнить, учитывая только ущерб водным биоресурсам. Оптимальной будет точка с минимальным ущербом.

– если значения гидробиологических показателей в рассматриваемых точках расположения отвалов и расстояние до них по вариантам отличаются незначительно, то в качестве функции поиска оптимума можно использовать показатель кратности разбавления ЗВ в облаке повышенной мутности на КР от ТС грунта. Оптимальной будет точка с максимальной кратностью разбавления.

– если значения гидробиологических показателей в рассматриваемых точках расположения отвалов по вариантам примерно равны, то минимум приведенных затрат по флоту будет наблюдаться в точке, ближайшей к месту выполнения дноуглубительных работ.

#### 4.2. Методические рекомендации по расчету распространения взвеси

Предлагаемая методика применяется для моделирования распространения ВВ при его залповых сбросах в водную среду (дампинг грунтов).

Методика позволяет получить информацию о характеристиках облака повышенной мутности в некоторый момент времени (при перемещении на КР): максимальное и среднее значения концентрации ВВ и ЗВ, попавших в водную среду после сброса грунта; общее количество ВВ в облаке и размеры самого облака.

Математическую модель необходимо использовать при исследовании распространения взвеси на небольшом удалении от ТС грунта, при слабом ветровом волнении и при малой скорости течения.

Рассмотрим практические рекомендации и последовательность выполнения расчетов по предложенной методике.

Исходными данными для выполнения расчетов являются данные о сбрасываемых грунтах дноуглубления, технологии разгрузки судна на отвале, данные, характеризующие природные условия среды в районе дампинга, и справочные материалы.

Данные, характеризующие грунты дноуглубления, включают гранулометрический состав и физические свойства грунтов. Характеристики грунта определяются по результатам инженерно-геологических изысканий либо принимаются нормативные значения для рассматриваемого вида грунтов.

Технологические параметры, характеризующие дампинг грунта:

- тип грунтоотвозного судна по принципу разгрузки на отвале (через днищевые люки или судно с раскрывающимся корпусом типа «гидроклапп»);
- норма загрузки трюма грунтом (определяется в соответствии с [12]);
- осадка судна в грузу (определяется по технической характеристике грунтоотвозного судна);
- площадь сбросного отверстия в днище грунтоотвозного судна (определяется по технической документации на грунтоотвозные суда);
- концентрация ВВ в момент сброса (определяется расчетным путем или по результатам наблюдений, например, [187, 188]).

Данные, характеризующие природные условия в районе дампинга:

- глубина воды на подводном отвале;

- горизонтальный ((4.1), (4.3)) и вертикальный ((4.4)-(4.5), (4.8)-(4.12)) коэффициенты турбулентной диффузии (определяются расчетным путем);
- средняя скорость течения (определяется по данным гидрологических изысканий, по имеющимся режимным характеристикам района дампинга либо рассчитывается (4.17)).

Справочные данные для выполнения расчетов включают:

- контрольное расстояние. Для соблюдения рыбохозяйственных норм это расстояние составляет 500 м для водотоков и водоемов и 250 м для прибрежной зоны морей от места сброса грунтов. Для хозяйственно-питьевых и коммунально-бытовых нужд контрольный створ находится на расстоянии 1 км от границ района водопользования на водотоке или водоеме, для прибрежной зоны морей – на ближней границе района водопользования либо зоны санитарной охраны [88];
- допустимое превышение концентрации ВВ над фоном на КР. В районах коммунально-бытового водопользования (для прибрежной зоны морей и пресноводных объектов), а также в водных объектах рыбохозяйственного назначения второй категории значение этого параметра составляет  $0,75 \text{ мг/дм}^3$ . В случае если дампинг грунта осуществляется вблизи района хозяйственно-питьевого водопользования, допустимое превышение концентрации взвеси на КР принимается равным  $0,25 \text{ мг/дм}^3$ . Для водных объектов, которые содержат более  $30 \text{ мг/дм}^3$  природных минеральных веществ, допускается увеличение концентрации ВВ в пределах 5 % [18];
- скорость осаждения отдельных фракций частиц сбрасываемых грунтов (определяется как гидравлическая крупность для среднего диаметра частиц каждой фракции).

Согласно данным натурных измерений [22] в качестве наиболее консервативной оценки общего количества взвеси, оставшейся в воде и участвующей в фазе адвективного переноса и диффузии, может быть принято от 1 до 5 % общего количества сброшенного грунта.

Можно также использовать зависимость [17, 189], дающую возможность

оценивать количество грунта, переходящего во взвешенное состояние при дампинге, с учетом основных факторов: удельного сцепления грунта, стратификации и глубины в районе отвала, а также технологических параметров сброса – формула (1.8).

Экспериментально горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии  $D_T$  (см<sup>2</sup>/с) для некоторого момента времени  $t$  (с) можно определить по следующей формуле [190]

$$D_T = \sigma_{rc}^2 / (4t), \quad (4.1)$$

где  $\sigma_{rc}^2$  – эффективная радиальная дисперсия, см<sup>2</sup>.

Используя формулу (4.1), в результате обработки экспериментальных данных (Северное море, у м. Канаверал, Нью-Йоркская бухта, у побережья Калифорнии, р. Банана и р. Манокин) Окубо получил следующие эмпирические зависимости [190]:

$$\sigma_{rc}^2 = 0,0108t^{2,34}, \quad (4.2)$$

$$D_T = 0,0103l^{1,15}, \quad (4.3)$$

где  $l = 3\sigma_{rc}$  – масштаб явления (эквивалентный радиус пятна), см.

В рассматриваемой в диссертационном исследовании задаче радиус пятна может изменяться от 500 см (при сбросе грунта с шаланды) до 10000 см (при сбросе грунта с самоотвозного землесоса на циркуляции). В соответствии с формулой (4.3)  $D_T$  будет находиться в интервале 0,0013 – 0,041 м<sup>2</sup>/с.

В соответствии с (4.1) и (4.2)  $D_T$  составит 0,0005 – 0,03 м<sup>2</sup>/с при  $t = 289 – 5774$  с (средняя скорость диффузии по данным ЧерноморНИИпроект составляет 0,01 м/с).

Таким образом, среднее значение  $D_T$  в рассматриваемых пространственно-временных масштабах будет равно примерно 0,014 м<sup>2</sup>/с.

Расчет вертикальной составляющей коэффициента турбулентной

диффузии ( $D_B$ ) можно выполнить по формулам различных авторов:

Караушев А. В. [151] (при слабом (4.4) и существенном (4.5) ветровом волнении,  $m^2/c$ ):

$$D_B = gHV_{CP} / (MC); \quad (4.4)$$

$$D_B = (ch + \pi V_{CP} H) d_3^{1/3} / (bH^{1/3}), \quad (4.5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$H$  – глубина (толщина слоя), м;

$V_{CP}$  – средняя по глубине скорость ветрового течения, м/с;

$C$  – коэффициент Шези,  $m^{0.5}/c$ , определяется по формуле [151]

$$C = 33(H / d_3)^{1/6}, \quad (4.6)$$

где  $d_3$  – эффективный диаметр донных отложений, соответствующий 10 % содержания крупных частиц, мм;

$M$  – функция коэффициента Шези

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } 10 < C < 60 \\ 48, & \text{при } C \geq 60; \end{cases} \quad (4.7)$$

$c$  – скорость волны, м/с;

$h$  – высота волн 1%-й обеспеченности в системе, м;

$b$  – эмпирический коэффициент, ориентировочно принимаемый равным 700, его значение получено по данным натурных исследований;

Цикунов В. А. (в слое волнового перемешивания,  $cm^2/c$ ) [191]

$$D_B = 3,14 \times 10^{-3} ch; \quad (4.8)$$

Башкиров Г. С. (при совместном действии волн и течения,  $cm^2/c$ ) [191]

$$D_B = k_U V_{CP} \lambda_{CP} / 40, \quad (4.9)$$

$k_U$  – интенсивность турбулентности (по рекомендации Судольского А. С. равна 0,80 для разнонаправленного ветрового течения и 0,12 для однонаправленного);

$\lambda_{CP}$  – средняя длина волн в системе, м;

Судольский А. С. (для однонаправленного и разнонаправленного течений, см<sup>2</sup>/с) [191]:

$$D_B = 0,60 \times 10^{-2} V_{CP} \lambda_{CP}; \quad (4.10)$$

$$D_B = 2,20 \times 10^{-2} |V_{CP}| \lambda_{CP}^{1,5} H^{-0,5}; \quad (4.11)$$

Боуден К. Ф. [190] (вблизи поверхности)

$$D_B = k_0 u_* z, \quad (4.12)$$

где  $k_0$  – постоянная Кармана, равная 0,4;

$u_*$  – скорость трения в воде, м/с,  $u_* = 0,035 W_*$ ,  $W_*$  – скорость трения ветра, равная 0,17 м/с для условий СЗШЧМ (средние скорости ветра 5-6 м/с) [191];

$z$  – расстояние от границы, м.

Расчеты по формулам (4.4) – (4.11) показали, что среднее значение  $D_B$  может находиться в пределах от 0,0050 до 0,0200 м<sup>2</sup>/с [191]. В среднем  $D_B$  составит 0,012 м<sup>2</sup>/с.

Из приведенных расчетов видно, что порядок значений  $D_B$  и  $D_T$  совпадает. Таким образом, в рассматриваемой задаче в качестве рабочего можно принять предположение об изотропности турбулентной диффузии. Данное заключение соответствуем мнению многих авторов (например, [151]) при рассмотрении диффузии на небольшом удалении от источника.

Стратификация вод ухудшает турбулентный обмен по вертикали. Учет этого эффекта можно выполнить по формуле [190]

$$D_B = D_{B0} (1 + Ri_H)^{-2}, \quad (4.13)$$

где  $D_{B0}$  – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии при нейтральной стратификации;

$Ri_H$  – глобальное число Ричардсона в слое  $H$ , рассчитывается по формуле

$$Ri_H = gH\Delta\rho/[\rho(\Delta V)^2], \quad (4.14)$$

где  $\Delta\rho$  и  $\Delta V$  – изменение плотности воды и скорости течения в слое  $H$ .

Оценим вертикальный коэффициент турбулентной диффузии по формуле (4.11) для средних условий на СЗШЧМ: средняя глубина – 20 м; средняя скорость ветра – 5–6 м/с; разнонаправленные по вертикали течения со средней по вертикали и по модулю скоростью  $|V_{CP}|$  равны 0,1–0,2 м/с; водная толща стратифицирована с числом Ричардсона от 0,5 до 5,0.

Средний период волн на глубокой воде ( $H \geq \lambda_{CP}$ ) при скорости ветра 5–6 м/с составит 3,2–3,5 с [192]. В соответствии с (4.11): при скорости течения  $|V_{CP}| = 0,2$  м/с значение  $D_{B0}$  будет находиться в диапазоне 0,063–0,082 м<sup>2</sup>/с; при  $|V_{CP}| = 0,1$  м/с значение  $D_{B0} = 0,032$ –0,041 м<sup>2</sup>/с.

Расчеты по формуле (4.12) для средних условий СЗШЧМ дают следующие результаты: при  $H = 15$  м –  $D_{B0} = 0,036$  м<sup>2</sup>/с, при  $H = 20$  м –  $D_{B0} = 0,048$  м<sup>2</sup>/с и при  $H = 25$  м –  $D_{B0} = 0,060$  м<sup>2</sup>/с, которые совпадают с расчетами по формуле (4.11) при нейтральной стратификации.

При  $Ri_H = 0,5$  значения  $D_B$  в соответствии с формулой (4.13) будут находиться в диапазоне 0,014–0,017 м<sup>2</sup>/с и 0,028–0,037 м<sup>2</sup>/с при скорости течения 0,1 м/с и 0,2 м/с соответственно; при  $Ri_H = 5,0$  значения  $D_B$  будут равны 0,0009–0,0011 м<sup>2</sup>/с и 0,0017–0,0023 м<sup>2</sup>/с. Среднее значение  $D_B$  составит **0,013** м<sup>2</sup>/с.

Аналогичные расчеты при тех же условиях по формуле Башкирова Г. С. (4.9) дают среднее значение  $D_B$  равное **0,012** м<sup>2</sup>/с.

Расчет  $D_B$  по формуле Караушева А. В. (4.4), рекомендованной автором

для акваторий со слабым ветровым волнением, при рассматриваемых условиях дает следующий результат: при  $V_{CP} = 0,2$  м/с и соответствующих этой скорости течения значениях коэффициента Шези  $50-60 \text{ м}^{0,5}/\text{с} - D_B = 0,019-0,014 \text{ м}^2/\text{с}$ ; при  $V_{CP} = 0,1$  м/с –  $D_B = 0,0096-0,0068 \text{ м}^2/\text{с}$ . Среднее значение  $D_B$  составит **0,012** м<sup>2</sup>/с. Видно, что универсальная формула Караушева А. В. дает вполне удовлетворительный результат при рассматриваемых в диссертационном исследовании пространственно-временных масштабах в средних для СЗШЧМ гидрометеорологических условиях.

Совместный эффект вертикальной диффузии и сдвига скорости течения по глубине приводит к лучшему рассеянию примеси в пятне в направлении течения. Это проявляется в вытягивании пятна примеси вдоль течения (пятно приобретает форму эллипса). В стационарном течении при большом времени диффузии данный эффект может существенно влиять на распределение примеси.

Для ограниченной по глубине акватории важным является соотношение отрезка времени  $\tau_0$ , необходимого для перемешивания примеси по всей толще, к периоду действия течения  $T$ . Если  $\tau_0 \gg T$ , то сдвиг скорости в периодическом течении не влияет на распределение примеси [193]. Этот вывод можно сформулировать иначе: если в рамках задачи время диффузии (перемещения пятна на КР)  $T$  мало по сравнению с  $\tau_0$ , то эффект сдвига не оказывает существенное влияние на распределение примеси в пятне на КР.

Время перемещения пятна на КР составляет 1250–2500 с (см. выше).

Стандартное отклонение по вертикали  $\sigma_Z^2$  определяется по формуле [190]

$$\sigma_Z^2 = 2D_B t. \quad (4.15)$$

При перемешивании вещества по всей толще  $\sigma_Z = H$  и  $t = \tau_0$ , тогда

$$\tau_0 = H^2 / (2D_B). \quad (4.16)$$

На глубинах 15–25 м при средних условиях  $D_B$  составит порядка 0,012 м<sup>2</sup>/с (см. выше), тогда в соответствии с (4.16)  $\tau_0$  будет находиться в пределах примерно 9400–26000 с. Видно, что  $\tau_0$  гораздо больше времени перемещения пятна на КР. Таким образом, в нашем случае сдвиг не повлияет существенно на распределение ВВ в пятне на КР.

В расчетах принимается постоянное значение глубины  $H_{CP}$ , равное глубине воды на отвале, и средней по вертикали скорости течения  $V_{CP}$  (это обусловлено рассматриваемыми пространственно-временными масштабами – до нескольких часов и до нескольких километров).

При расчете переноса и диффузии ЗВ можно использовать формулу средней скорости дрейфового течения, предложенную А. В. Караушевым [151]

$$V_{CP} = k_m W_2 \sqrt{3 + 10h_{1\%}}, \quad (4.17)$$

где  $k_m$  – коэффициент, зависящий от коэффициента Шези  $C$  и определяемый по табл. 4.1;

$W_2$  – скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью;

$h_{1\%}$  – средняя для рассматриваемого участка высота волны 1%-ной обеспеченности в системе, м.

Таблица 4.1

**Значения  $k_m$  в зависимости от коэффициента Шези  $C$  [151]**

$C$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$k_m$	0,0010	0,0018	0,0027	0,0034	0,0042	0,0050	0,0055	0,0060	0,0064	0,0068

При полидисперсном составе взвеси расчеты производятся отдельно для каждой фракции ( $i$ ). Общее решение получается путем простой суперпозиции решений для отдельных фракций.

При диаметрах частиц взвеси  $d < 100$  мкм их гидравлическая крупность  $u$  (скорость осаждения) рассчитывается с помощью формулы Стокса [194]

$$u = \frac{gd^2}{18\nu} \frac{\gamma_s - \gamma_0}{\gamma_0}, \quad (4.18)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma_s$  и  $\gamma_0$  – плотность частиц взвеси и воды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с.

Скорости осаждения частиц взвеси с  $d > 100$  мкм могут быть получены по формуле [195]

$$u = \sqrt{\frac{4gd}{3C} \frac{\gamma_s}{\gamma_0}}, \quad (4.19)$$

где  $C$  – эмпирическая постоянная, по экспериментальным данным равная 0,45.

Для широкого диапазона диаметров частиц можно использовать формулу (4.20) [196]

$$u = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \left( \frac{36\nu}{d} \right)^2 + 7,5 \left( \frac{\gamma_s - \gamma_0}{\gamma_0} \right) dg \right]^{1/2} - \frac{36\nu}{d} \right\}. \quad (4.20)$$

Унифицированная формула гидравлической крупности наносов [194]

$$u = \frac{(2,4\theta - 0,7)gd^2}{-18(2,4\theta - 0,7)\nu + d \sqrt{\frac{gd(\gamma_s - \gamma_0)}{\gamma_0}}} \frac{\gamma_s - \gamma_0}{\gamma_0}, \quad (4.21)$$

где  $\theta$  – коэффициент формы частицы, определяется по формуле

$$\theta = d^2/(ab),$$

где  $a$  и  $b$  – два наибольших из трех (длина, ширина и толщина) взаимно

перпендикулярных линейных измерений частицы, мм.

Расчет гидравлической крупности частиц наносов по формуле (4.21) представлен в табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Расчет гидравлической крупности частиц наносов по формуле (4.21) [194]**

Диаметр частиц, мм	Температура $t$ , °C					
	5	10	15	20	25	30
	Гидравлическая крупность $u$ , мм/с					
0,001	0,00059	0,00069	0,00079	0,00089	0,00100	0,00112
0,005	0,0148	0,0172	0,0197	0,0223	0,0250	0,0279
0,010	0,0593	0,0689	0,0784	0,0888	0,0997	0,1231
0,015	0,133	0,154	0,176	0,199	0,223	0,249
0,020	0,235	0,272	0,311	0,351	0,394	0,439
0,030	0,525	0,606	0,691	0,780	0,874	0,971
0,040	0,923	1,064	1,212	1,366	1,527	1,694
0,050	1,426	1,640	1,864	2,097	2,340	2,590
0,060	2,03	2,33	2,64	2,96	3,30	3,64
0,070	2,72	3,12	3,53	3,95	4,39	4,84
0,080	3,50	4,00	4,52	5,06	5,60	6,16
0,090	4,37	4,98	5,61	6,26	6,92	7,59
0,10	5,30	6,04	6,79	7,55	8,33	9,12
0,15	10,95	12,32	13,69	15,06	16,41	17,75
0,20	17,72	19,72	21,68	23,58	25,43	27,22
0,25	25,13	27,68	30,13	32,46	34,69	36,80
0,30	32,85	35,84	38,66	41,31	43,79	46,11
0,40	48,32	51,91	55,19	58,18	60,92	63,42
0,50	63,15	67,02	70,48	73,58	76,35	78,84
0,75	95,89	99,79	103,14	106,04	108,57	110,78
1,00	123,09	126,66	129,67	132,13	134,42	136,12
1,25	146,23	149,43	152,09	154,39	156,24	157,88
1,50	166,46	169,32	171,69	173,67	175,34	176,76

Для расчета распространения ВВ в плоской и пространственной постановках задачи по разработанной методике необходимо знать концентрацию примеси в момент сброса ( $C_0$ ), мг/дм<sup>3</sup>; среднюю глубину на акватории ( $H_{CP}$ ), м; среднюю скорость течения ( $V_{CP}$ ), м/с; гидравлическую крупность фракции взвеси ( $u$ ), см/с; вертикальный коэффициент турбулентной

диффузии ( $D_B$ ),  $\text{м}^2/\text{с}$ . В рассматриваемых пространственно-временных масштабах предполагаем  $D_T = D_B$ .

Выбор модели расчета осуществляется путем сравнения расчетной толщины слоя  $\Delta z_{ДП}$  (3.65) со средней глубиной на экватории:

- при  $\Delta z_{ДП} \geq H_{CP}$  – можно использовать двумерную модель;
- при  $\Delta z_{ДП} < H_{CP}$  – используется трехмерная модель.

Последовательность выполнения расчетов распространения ВВ в плоской постановке задачи по разработанной методике [197]:

– пятно взвеси представляется кругом. Его начальный радиус  $R_0$  может быть принят на основании визуальных оценок характерного масштаба видимой поверхностной части пятна взвеси непосредственно после сброса. При отсутствии данных или возможностей проведения таких наблюдений  $R_0$  определяется, исходя из площади ( $\omega$ ) сбросного отверстия в днище грунтоотвозного судна, по формуле

$$R_0 = \sqrt{\omega / \pi}, \quad (4.22)$$

где  $R_0$  – начальный радиус пятна взвеси, м;

$\omega$  – площадь днищевой двери (люка) грунтоотвозного судна,  $\text{м}^2$ ;

– пятно взвеси по горизонтали разбивается на кольца с шагом  $\Delta r$ . Шаг  $\Delta r$  определяется по формуле

$$\Delta r = R_0 / N_0, \quad (4.23)$$

где  $N_0$  – количество колец в пятне взвеси в начальный момент времени.

Оптимальное начальное количество колец  $N_0$  в пятне взвеси составляет 3-6;

– пятно взвеси рассматривается через равные интервалы времени  $\Delta t$ . Шаг во времени  $\Delta t$  рассчитывается по формуле (3.14);

– определяется количество интервалов времени перемещения пятна

взвеси на КР по формуле

$$K_{KP} = T_{KP} / \Delta t, \quad (4.24)$$

где  $T_{KP}$  – время перемещения пятна взвеси на КР, с;

– рассчитывается время перемещения пятна взвеси на КР  $T_{KP}$  по формуле

$$T_{KP} = S_{KP} / V_{CP}, \quad (4.25)$$

где  $S_{KP}$  – контрольное расстояние, м;

– определяются коэффициенты  $b_n$  и  $d_n$  по формулам (3.10)-(3.11);

– проверяется условие  $b_n + d_n = 0,5$ ;

– рассчитываются параметры  $a$  и  $f$  по формулам (3.8) и (3.9) соответственно. При расчете  $a$  и  $f$  должно выполняться условие  $(a + f) \leq 0,5$ . В случае, когда данное условие не выполняется, следует увеличить  $\Delta r$  или уменьшить  $\Delta t$  и рассчитать новые значения параметров  $a$  и  $f$ ;

– в начальный момент времени в первых  $N_0$  колец пятна взвеси, начиная от центра, записывается начальная концентрация взвеси  $C_0$ . Концентрация вещества в кольцах пятна в следующий момент времени (через  $\Delta t$ ) рассчитывается по формуле (3.6). Расчет ведется пошагово от одного момента времени к другому в пределах всего рассматриваемого периода времени  $K_{KP}$ ;

– в каждый момент времени для консервативного вещества проверяется выполнение условия (3.15);

– если размеры колец очень малы, то расчет выполняется до момента времени, когда пятно взвеси распространяется на 20-50 колец. После этого кольца объединяются по  $\mu = 2, 3 \dots$ . Новая ширина колец  $\Delta r_2$  будет равна  $\mu \Delta r_1$ . Концентрация усредняется с учетом площади колец

$$C_{2kj} = \frac{\sum_{\mu(j-1)+1}^{\mu j} (2n-1)C_{1kn}}{\sum_{\mu(j-1)+1}^{\mu j} (2n-1)}, \quad \text{при } j=1, 2, \dots, n_k/\mu, \quad (4.26)$$

где  $C_{2kj}$  – концентрация в  $j$ -том кольце, новая ширина которого  $\Delta r_2$  в  $k$ -ый момент времени;

– определяется новый шаг во времени  $\Delta t_2 = \mu^2 \Delta t_1$  и расчет продолжается.

При необходимости укрупнение можно повторить;

– после укрупнения проверку расчетов необходимо выполнять по условию (3.15), заменив в правой части  $N_0^2$  на  $(N_0/\mu)^2$ .

Последовательность выполнения расчетов распространения ВВ в пространственной постановке задачи по разработанной методике [197, 198]:

– облако повышенной мутности представляется в виде цилиндра с высотой  $H_{CP}$ , начальный радиус которого  $R_0$  определяется по формуле (4.22);

– облако повышенной мутности по горизонтали разбивается на кольца с шагом  $\Delta r$ . Шаг  $\Delta r$  определяется по формуле (4.23);

– по вертикали горизонтальными плоскостями облако повышенной мутности разбивается на слои с шагом  $\Delta z$ . Шаг  $\Delta z$  определяется по формуле

$$\Delta z = H_{CP} / M_0, \quad (4.27)$$

где  $M_0$  – количество слоев в облаке повышенной мутности.

Оптимальное количество слоев по глубине, необходимое для расчетов при различных значениях  $f$ , составляет 6-8;

– облако повышенной мутности рассматривается через равные интервалы времени  $\Delta t$ , которые не должны превышать  $\Delta t_{ПР}$ , рассчитанного по формуле (3.64);

– количество интервалов времени перемещения облака повышенной мутности на КР  $K_{KR}$  определяется по формуле (4.24);

– время перемещения облака повышенной мутности на КР  $T_{KR}$  рассчитывается по формуле (4.25);

– определяются коэффициенты  $b_n$  и  $d_n$  по формулам (3.10)-(3.11);

– проверяется условие  $b_n + d_n = 0,5$ ;

– при  $\Delta r = \Delta u$  параметры  $a_1 = a_2 = 0,125$ . Если, по условию задачи не

представляется возможным приравнять  $\Delta r$  и  $\Delta z$ , то параметры  $a_1$  и  $a_2$  рассчитываются по формулам (3.41)-(3.42);

- проверяется выполнение условия (3.62);
- рассчитывается параметр  $f$  по формуле (3.43);
- помимо условия (3.62) необходимо, чтобы выполнялось условие (3.63).

В случае, если условия (3.62) и (3.63) не выполняются, следует уменьшить  $\Delta r$  и  $\Delta z$ , рассчитать новые значения параметров  $\Delta t$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $f$ ;

- в  $N_0$  первых колец во всех слоях, начиная от центра пятна, записывается начальная концентрация взвеси  $C_0$ . Концентрация вещества в следующий момент времени через  $\Delta t$  рассчитывается по формулам (3.40) и (3.60) для водной толщи, (3.51), (3.59) и (3.58), (3.61) – для поверхностного и придонного слоев соответственно. Расчет ведется пошагового от одного момента времени к другому в пределах всего рассматриваемого периода времени  $K_{KP}$ ;

- в каждый момент времени должно выполняться условие (3.66).

Численный эксперимент по предложенной методике автоматизирован в расчетном модуле «Дампинг-взвесь». Расчеты выполняются в табличной форме.

#### 4.3. Оптимизация дампинга грунтов дноуглубления акватории МТП «Керчь»

На основании обобщения опыта дноуглубления и складирования грунтов, анализа эксплуатации локальных отвалов и результатов мониторинговых работ был определен поисковый полигон для организации нового отвала грунтов дноуглубления в Керченском предпроливье Черного моря (рис. 4.1).

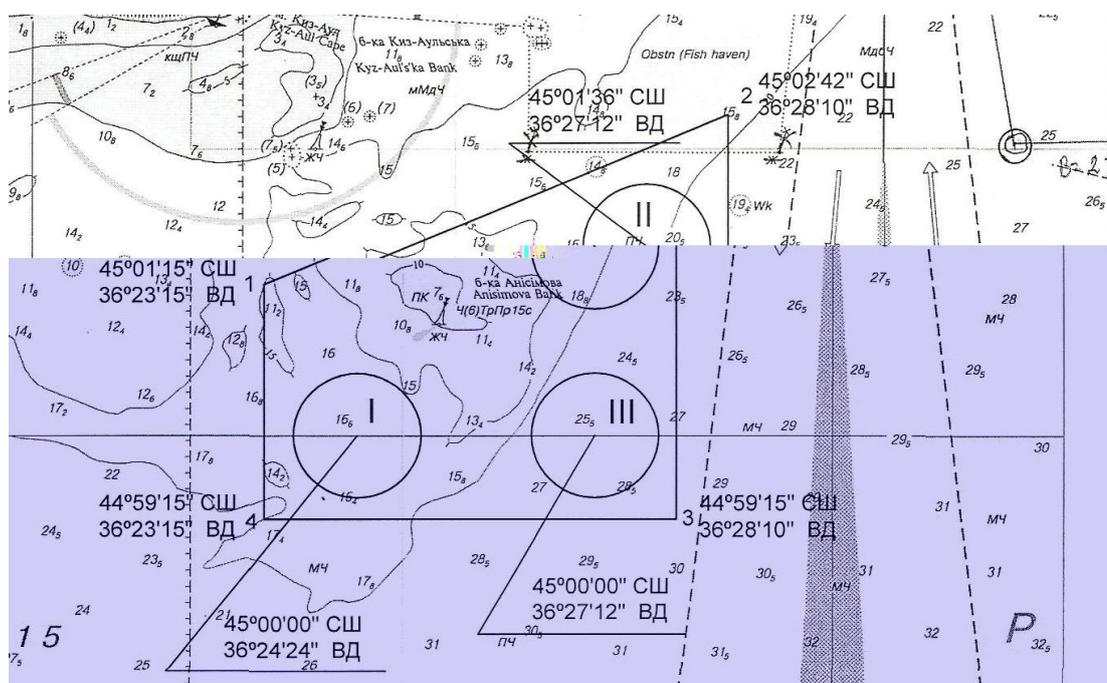


Рис. 4.1. Расположение перспективных точек отвала грунтов МТП «Керчь» [148].

В пределах полигона для дампинга грунтов дноуглубления акватории МТП «Керчь» были определены три перспективные точки [148].

Диаметр отвалов принят равным 1 морской миле (КР составляет 900 м).

Точка № 1: координаты  $45^{\circ}00'00''$  СШ и  $36^{\circ}24'24''$  ВД; средняя глубина ( $H_{CP}$ ) – 16,0 м; средняя скорость течения ( $V_{CP}$ ) – 0,10 м/с.

Точка № 2: координаты  $45^{\circ}01'36''$  СШ и  $36^{\circ}27'12''$  ВД;  $H_{CP} = 20,0$  м;  $V_{CP} = 0,20$  м/с.

Точка № 3: координаты  $45^{\circ}00'00''$  СШ и  $36^{\circ}27'12''$  ВД;  $H_{CP} = 25,0$  м;  $V_{CP} = 0,15$  м/с.

Согласно средневзвешенной суммарной бальной оценке по градации ГИС «Дампинг» I участок набрал 142 балла, II участок – 181 балл и III участок – 174 балла.

Исходя из того, что расстояние до отвалов (рис. 4.1) и значения гидробиологических показателей в точках их расположения по вариантам отличаются незначительно, поиск оптимального решения следует выполнить по 3-ему достаточному условию (п. 1.3): по лучшему рассеянию (кратности

разбавления) ЗВ, попадающих в морскую среду после сброса грунта [199].

Исходные данные. Объем залпового сброса грунта из трюма шаланд составляет 500 м<sup>3</sup>, площадь открываемых ляд трюмов – 100 м<sup>2</sup>. Концентрация ВВ в ТС грунта принята согласно [187, 188] 600 мг/дм<sup>3</sup>.

Гранулометрический состав (табл. 4.3) и результаты химического анализа проб морских донных отложений с акватории Керченского МТП (табл. 4.4) приняты по данным порта.

Таблица 4.3

**Гранулометрический состав грунтов дноуглубления МТП «Керчь» [148]**

№№ проб	Содержание фракций грунта, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,10-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	менее 0,005 мм	
1	6,0	2,0	15,0	21,0	17,0	18,0	21,0	1,40
2	5,0	7,0	14,0	17,0	23,0	19,0	15,0	1,71
3	2,0	7,0	12,0	20,0	18,0	22,0	19,0	1,62
Сред.	4,0	5,0	14,0	19,0	19,0	20,0	19,0	1,56

Таблица 4.4

**Содержание ЗВ в грунтах дноуглубления акватории МТП «Керчь» [148]**

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Акватория	ГХФ	Класс
1	Кадмий	мг/кг	0,10	0,30	А
2	Ртуть	мг/кг	0,06	0,40	А
3	Свинец	мг/кг	3,25	20,0	А
4	Цинк	мг/кг	97,1	94,0	II
5	Медь	мг/кг	32,7	40,0	I
6	Железо	мг/кг	14100	36800	–
7	Марганец	мг/кг	372	650	–
8	Хром	мг/кг	48,1	84,0	–
9	НП	мг/кг	295	–	II

В табл. 4.5 приведены исходные данные и результаты промежуточных расчетов параметров модели для различных фракций грунта.

Таблица 4.5

## Исходные данные

Параметр	Значение параметра в точках		
	1	2	3
Контрольное расстояние $L$ , м	900	900	900
Средняя глубина $H$ , м	16,0	20,0	25,0
Средняя скорость $V$ , м/с	0,10	0,20	0,15
Концентрация ВВ в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	600	600	600
Вертикальный коэф. турбулентной диффузии $D_B$ , м <sup>2</sup> /с	0,00765	0,0191	0,0179
Начальный радиус пятна взвеси $R_0$ , м	5,64	5,64	5,64
Толщина слоя по глубине $\Delta z$ , м	1,60 (1,00*)	2,00	2,50
Ширина колец $\Delta r$ , м	1,88	1,88	1,88
Шаг во времени $\Delta t$ , с	90 (30*)	45	60
Гидравлическая крупность $u_1$ , см/с	1,38	1,38	1,38
Содержание фракции в грунте, %	14,0	14,0	14,0
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	84,0	84,0	84,0
Параметр $f_1$	0,2070*	0,1553	0,1656
$\Delta z_{ЛР}$ , м	1,11	2,77	2,59
Параметр $a_1$	0,0648*	0,2432	0,3040
Параметр $a_2$	0,2295*	0,2151	0,1721
Гидравлическая крупность $u_2$ , см/с	0,32	0,32	0,32
Содержание фракции в грунте, %	19,0	19,0	19,0
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	114,0	114,0	114,0
Параметр $f_2$	0,0900	0,0360	0,0384
$\Delta z_{ЛР}$ , м	4,78	11,94	11,19
Параметр $a_1$	0,1945	0,2432	0,3040
Параметр $a_2$	0,2689	0,2151	0,1721
Гидравлическая крупность $u_3$ , см/с	0,05	0,05	0,05
Содержание фракции в грунте, %	19,0	19,0	0,19
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	114,0	114,0	114,0
Параметр $f_3$	0,0141	0,00562	0,00600
$\Delta z_{ЛР}$ , м	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$
Параметр $a_1$	0,1945	0,2432	0,3040
Параметр $a_2$	0,2689	0,2151	0,1721
Гидравлическая крупность $u_4$ , см/с	0,003	0,003	0,003
Содержание фракции в грунте, %	0,20	0,20	0,20
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	120,0	120,0	120,0
Параметр $f_4$	0,000844	0,000338	0,000360
$\Delta z_{ЛР}$ , м	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$
Параметр $a_1$	0,1945	0,2432	0,3040
Параметр $a_2$	0,2689	0,2151	0,1721
Гидравлическая крупность $u_5$ , см/с	0,0003	0,0003	0,0003
Содержание фракции в грунте, %	19,0	19,0	0,19
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	114,0	114,0	114,0
Параметр $f_5$	0,0000844	0,0000338	0,0000360
$\Delta z_{ЛР}$ , м	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$	$> H_{CP}$
Параметр $a_1$	0,1945	0,2432	0,3040
Параметр $a_2$	0,2689	0,2151	0,1721
Время пересечения КР, с	9000	4500	6000
Количество интервалов времени до пересечения КР	100	100	100

Примечание: \* – параметры модели для фракции ВВ с  $u = 1,38$  см/с в точке I

В табл. 4.5 не включены данные расчетов по фракциям грунта с  $u > 1,38$  см/с, так как эти фракции на расстоянии 100-120 м от ТС полностью оседают на дно [200].

Приведем подробный расчет распространения ВВ в пространственной постановке задачи для точки I согласно предложенной инженерной методики.

При выполнении эксперимента вертикальный коэффициент турбулентной диффузии составляет  $0,00765$  м<sup>2</sup>/с.

Начальный радиус пятна взвеси  $R_0$  исходя из площади ( $\omega$ ) сбросного отверстия в днище грунтоотвозного судна равен (формула (4.22))

$$R_0 = \sqrt{\omega / \pi} = \sqrt{100 / 3,14} = 5,64 \text{ (м)}.$$

Пятно взвеси по горизонтали разбиваем на кольца с шагом  $\Delta r$ , который согласно формуле (4.23) равен

$$\Delta r = R_0 / N_0 = 5,64 / 3 = 1,88 \text{ (м)}.$$

По вертикали горизонтальными плоскостями облако повышенной мутности разбивается на слои с шагом  $\Delta z$  (формула (4.27))

$$\Delta z = H_{CP} / M_0 = 16 / 10 = 1,6 \text{ (м)}.$$

По условию (3.65)  $\Delta z_{ПР}$  для фракций грунта с различной гидравлической крупностью равна:

$$\Delta z_{ПР1} = 2 * 0,00765 / 0,0138 = 1,11 \text{ (м)} < H_{CP};$$

$$\Delta z_{ПР2} = 2 * 0,00765 / 0,0032 = 4,78 \text{ (м)} < H_{CP};$$

$$\Delta z_{ПР3} = 2 * 0,00765 / 0,0005 = 30,6 \text{ (м)} > H_{CP};$$

$$\Delta z_{ПР4} = 2 * 0,00765 / 0,00003 = 510 \text{ (м)} > H_{CP};$$

$$\Delta z_{ПР5} = 2 * 0,00765 / 0,000003 = 5100 \text{ (м)} > H_{CP}.$$

Моделирование распространения фракций ВВ с гидравлической крупностью частиц не более 0,05 см/с можно выполнять в плоской постановке задачи, поскольку  $\Delta z_{ПР} > H_{CP}$  (табл. Д.1-Д.5).

Облако повышенной мутности рассматривается через равные интервалы

времени  $\Delta t = 90 \text{ с} < \Delta t_{\text{ПР}} = 97 \text{ с}$  (формула (3.64)).

Время пересечения КР пятном взвеси составляет согласно формуле (4.25)

$$T_{\text{КР}} = S_{\text{КР}} / V_{\text{СР}} = 900 / 0,1 = 9000 \text{ (с)}.$$

Количество интервалов времени до момента пересечения пятном КР равно (формула (4.24))

$$K_{\text{КР}} = T_{\text{КР}} / \Delta t = 9000 / 90 = 100.$$

Определяем коэффициенты  $b_n$  и  $d_n$  по формулам (3.10)-(3.11) (табл. Д.6-Д.9 3-4 столбцы соответственно).

Так как  $\Delta r \neq \Delta y$  параметры  $a_1$  и  $a_2$  рассчитываются по формулам (3.41)-(3.42):

$$a_1 = 0,00765 * 90 / 1,88^2 = 0,1945;$$

$$a_2 = 0,00765 * 90 / 1,6^2 = 0,2689;$$

$$a_1 + a_2 = 0,1945 + 0,2689 = 0,46 < 0,5 \text{ – условие (3.62) выполняется.}$$

Рассчитываем параметр  $f$  по формуле (3.43) для фракций грунта с различной гидравлической крупностью:

$f_1 = 0,0138 * 90 / (2 * 1,6) = 0,388 > a_2$  – для данной фракции условие (3.63) не выполняется, следовательно уменьшили  $\Delta t$  и  $\Delta z$  и рассчитали новые значения параметров  $\Delta t$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $f$  (в табл. 4.5 отмечены \*);

$$f_2 = 0,0032 * 90 / (2 * 1,6) = 0,09 < a_2;$$

$$f_3 = 0,0005 * 90 / (2 * 1,6) = 0,0141 < a_2;$$

$$f_4 = 0,00003 * 90 / (2 * 1,6) = 0,000844 < a_2;$$

$$f_5 = 0,000003 * 90 / (2 * 1,6) = 0,0000844 < a_2.$$

Для всех фракций грунта выполняется условие (3.63), поэтому используются формулы (3.40), (3.51) и (3.58).

Результаты расчета представлены набором таблиц, каждая из которых соответствует определенному моменту времени. В  $N_0$  первых колец во всех слоях ( $M_0$ ), начиная от центра пятна, записана начальная концентрация ВВ  $C_0$  (табл. Д.6, Д.8). Концентрация вещества в следующие моменты времени через

$\Delta t$  рассчитана по формулам (3.40), (3.51) и (3.58).

Расчет выполнен пошагового от одного момента времени к другому в пределах всего рассматриваемого периода времени  $K_{KP}$ . В каждый момент времени выполняется условие (3.66).

Фрагменты распределения концентрации частиц ВВ крупностью 1,38 и 0,32 см/с приведены в табл. Д.6-Д.9. В последних двух строках этих таблиц выполнена проверка правильности расчета в соответствии с условием (3.66): предпоследняя строка – по левой части; последняя – по правой.

Полученные результаты в плоской и пространственной постановках задачи представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

**Максимальная концентрация фракций ВВ на КР**

$u$ , см/с	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	
	Плоская постановка	Пространственная постановка
1,38	0,003	0,000
0,32	1,984	0,816
0,05	9,339	10,559
0,003	12,843	12,964
0,0003	12,389	12,401
Сумма	36,558	36,740

Из табл. 4.6 видно, что результаты, полученные по плоской и пространственной моделям, практически совпадают при  $u_3 = 0,05$  см/с,  $u_4 = 0,003$  см/с и  $u_5 = 0,0003$  см/с, для которых  $\Delta z_{ДР} > H_{CP}$  (ранее выполненные расчеты). Таким образом, исследования процесса осаждения полидисперсного ВВ необходимо выполнять по трехмерной модели. И только в тех случаях, когда предельная толщина слоя  $\Delta z_{ДР}$  (формула (3.65)) больше средней глубины акватории, можно использовать плоскую модель.

Результаты эксперимента по трем перспективным точкам приведены в табл. Е.1-Е.9 и на рис. Е.1-Е.3 (Приложение Е).

В табл. 4.7 сведены результаты расчетов по перспективным точкам I-III.

**Сводная таблица показателей зоны повышенной мутности на КР при сбросе грунта в перспективных точках I-III**

Показатель	Значения показателя по точкам		
	I	II	III
Максимальная концентрация ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	36,7	36,0	29,0
Общее количество ВВ, % от исходного	53,1	62,9	61,9
Радиус зоны загрязнения по ВВ (при нормативе 0,75 мг/дм <sup>3</sup> ), м	32,0÷35,8	35,7÷39,5	37,6÷41,4
Площадь зоны загрязнения по ВВ, м <sup>2</sup>	3220÷4020	4000÷4900	4440÷5380
Кратность разбавления растворенных веществ	9,19	11,4	14,1
Максимальная концентрация железа, мг/дм <sup>3</sup>	0,92	0,74	0,60
Радиус зоны загрязнения по железу, м	28,1÷31,9	30,1÷33,9	32,0÷35,7

Из трех рассматриваемых точек более предпочтительной является точка III, поскольку рассеяние ЗВ в ней лучше, чем в других точках. На КР это видно по: наибольшей кратности разбавления (14,1); меньшей максимальной концентрации ВВ (29,0 мг/дм<sup>3</sup>) и железа (0,60 мг/дм<sup>3</sup>); бóльшим размерам зоны повышенной мутности.

Кроме того, взаимное расположение точки III и банки Анисимова (биологически более продуктивного участка по сравнению с окружающими участками дна (рис. 4.1)) таково, что в результате преимущественного переноса водных масс из Черного моря в Азовское море и наоборот, дампинг грунтов в точке III не будет влиять на банку Анисимова.

Оценим теперь продолжительность существования («жизни») зоны повышенной мутности при сбросе грунта в перспективных точках. В табл. 4.8 приведены результаты расчета максимальной концентрации полидисперсного ВВ и радиуса зоны повышенной мутности (при нормативе 0,75 мг/дм<sup>3</sup>) в различные моменты времени после сброса грунта.

**Максимальная концентрация и радиус зоны повышенной мутности в  
разные моменты времени после сброса грунта в перспективных точках**

Время, мин.	Значения $C_{MAX}$ и радиус зоны повышенной мутности					
	Точка I		Точка II		Точка III	
	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м
0	456,00	5,64	456,00	5,64	456,00	5,64
5	428,85	11,29	327,21	15,05	339,29	13,17
10	358,32	13,17	214,67	18,81	226,22	16,93
15	294,56	15,05	157,61	20,69	167,41	20,69
20	245,95	16,93	123,71	22,57	132,09	22,57
30	181,22	18,81	85,533	26,34	91,999	26,34
40	141,44	20,69	64,697	30,10	69,963	28,22
50	114,95	22,57	51,633	31,98	56,079	31,98
60	96,198	24,45	42,710	33,86	46,556	33,86
70	82,303	26,34	36,250	35,74	39,635	35,74
80	71,641	26,34	31,371	37,62	34,390	37,62
100	56,452	30,10	24,521	41,38	26,993	39,50
120	46,236	31,98	19,973	43,27	22,052	43,27
140	38,952	31,98	16,755	45,15	18,539	45,15
160	33,526	33,86	14,372	47,03	15,924	47,03
200	26,038	37,62	11,100	50,79	12,317	48,91
250	20,189	39,50	8,5629	52,67	9,5052	52,67
300	16,384	41,38	6,9249	56,43	7,6850	54,55
350	13,722	43,27	5,7866	58,31	6,4198	56,43
400	11,759	45,15	4,9523	58,31	5,4934	58,31
450	10,255	47,03	4,3157	60,20	4,7878	60,20
500	9,0672	48,91	3,8148	62,08	4,2334	62,08
600	7,3174	50,79	3,0784	62,08	3,4198	62,08
700	6,0967	52,67	2,5650	63,96	2,8530	63,96
800	5,2023	54,55	2,1883	62,08	2,4367	63,96
900	4,5222	54,55	1,9013	62,08	2,1189	63,96
1000	3,9901	56,43	1,6762	60,20	1,8690	62,08
1200	3,2155	56,43	1,3479	56,43	1,5030	60,20
1400	2,6824	58,31	1,1218	50,79	1,2499	56,43
1600	2,2951	58,31	0,9577	43,27	1,0656	48,91
1800	2,0016	56,43	0,8337	30,10	0,9263	41,38
1950	1,8245	56,43	0,7591	0,00	0,8425	31,98
2000	1,7718	56,43	0,7370	0,00	0,8176	28,22
2150	1,6297	56,43	0,6774	0,00	0,7508	0,00
2196	1,5903	54,55	0,6609	0,00	0,7323	0,00

Из рис. 4.2 видно, что в течение первого часа после сброса грунта в точке III происходит резкое снижение концентрации полидисперсного ВВ (примерно в 10 раз). Дальнейшее снижение проходит намного медленнее: в 100 раз концентрация снижается примерно через 8 часов после сброса; снижение до рыбохозяйственного норматива ( $0,75 \text{ мг/дм}^3$ ) наблюдается примерно через 36 часов (рис. 4.3).



Рис. 4.2. Снижение концентрации полидисперсного ВВ во времени при сбросе грунта в точке III (пунктиром проведен рыбохозяйственный норматив).

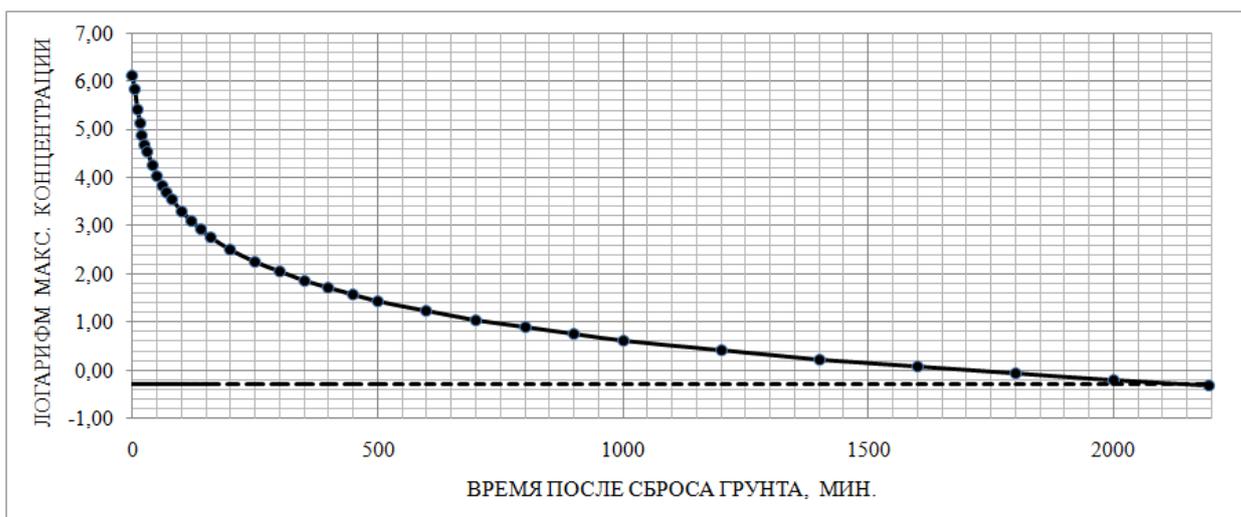


Рис. 4.3. Оценка времени «жизни» зоны повышенной мутности при сбросе грунта в точке III (пунктиром проведен рыбохозяйственный норматив).

Аналогичная картина происходит при сбросе грунта в точке II (табл. 4.8):

время «жизни» зоны повышенной мутности составляет примерно 33 часа. При сбросе грунта в точке I это время значительно превышает 36 часов.

Худшие условия рассеивания ВВ в точке I видны и при анализе динамики радиуса ( $r_3$ ) зоны повышенной мутности (рис. 4.4): после сброса грунта в точках II и III через 33 – 36 часов  $r_3$  равен 0; при сбросе грунта в точке I через 36 часов  $r_3$  составляет примерно 55 м (табл. 4.8).

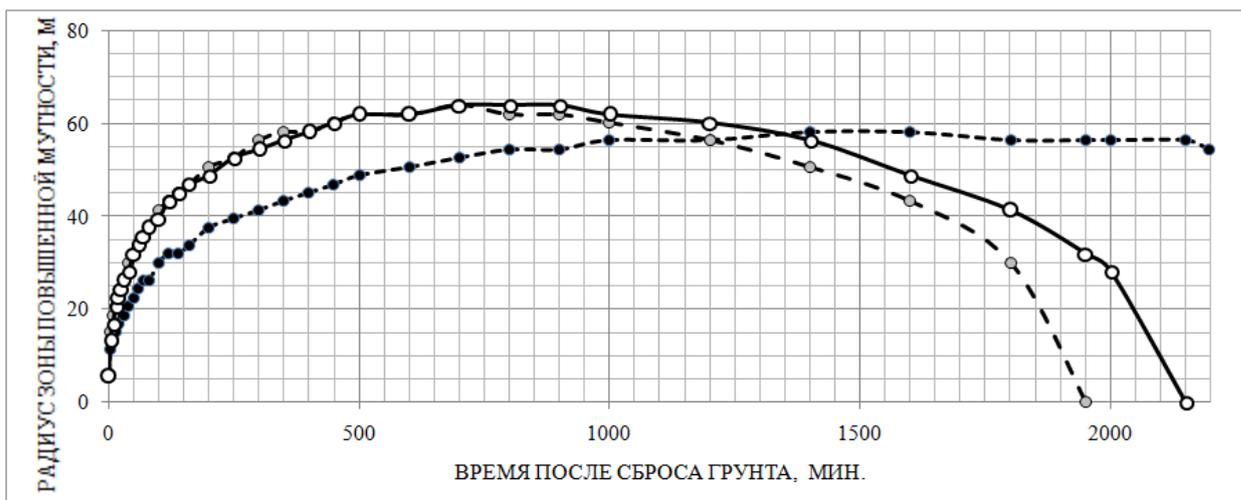


Рис. 4.4. Изменение радиуса зоны повышенной мутности во времени: точка I – мелкий пунктир; точка II – крупный пунктир; точка III – сплошная линия.

#### 4.4. Расчет динамики распространения взвесей и других загрязняющих веществ при дампинге грунтов дноуглубления ГСХ «Дунай – Черное море»

Оценим воздействие на морскую среду дампинга грунтов, извлекаемых при ремонтном дноуглублении с акватории МПК ГСХ «Дунай – Черное море» по гирлу Быстрое, на морской подводный отвал, представляющий собой окружность с координатами центра  $45^{\circ}19'13''$  N;  $29^{\circ}51'58''$  E (рис. 4.5).

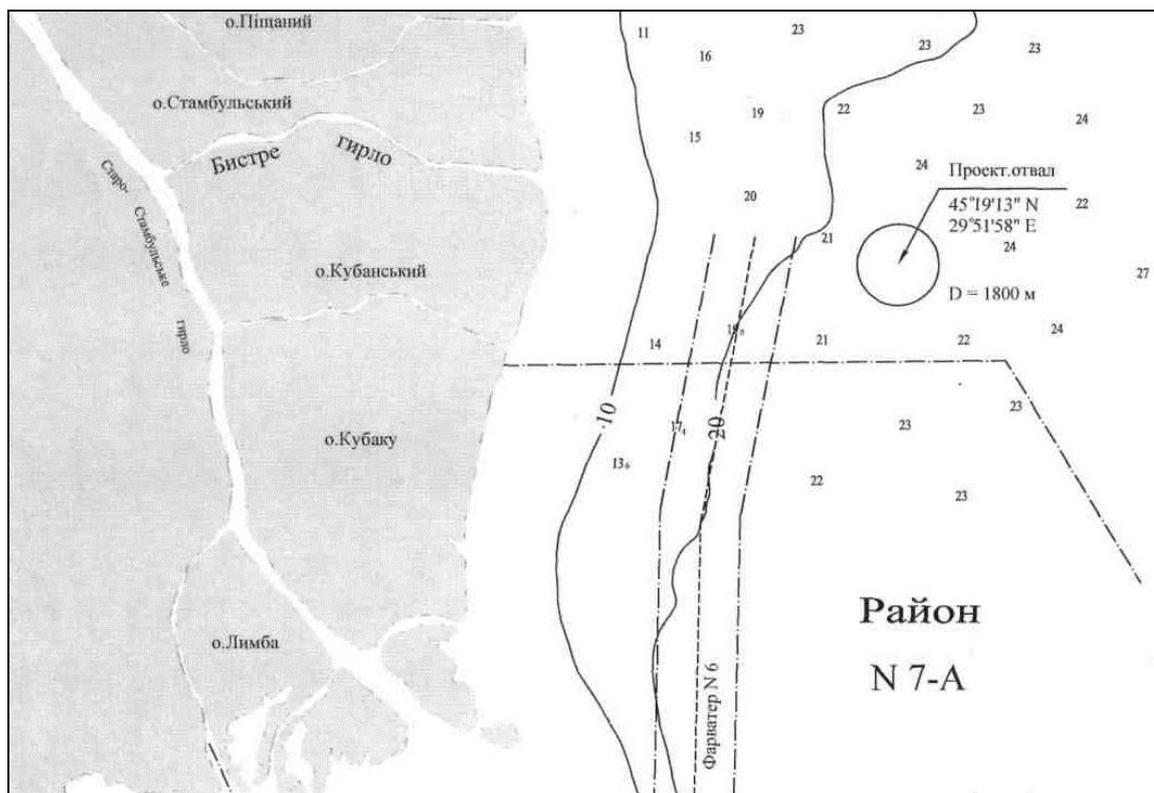


Рис. 4.5. Схема расположения подводного отвала грунтов дноуглубления ГСХ «Дунай – Черное море» [201].

Исходные данные. Объем залпового сброса грунта из трюмов самоотвозных землесосов составляет  $1000 \text{ м}^3$ , площадь открываемых ляд трюмов –  $150 \text{ м}^2$ . Концентрация ВВ в ТС грунта принята согласно [187, 188]  $1000 \text{ мг/дм}^3$ . Гранулометрический состав донных отложений (табл. 4.9) и результаты химического анализа проб морских донных отложений с акватории ГСХ «Дунай – Черное море» (табл. 4.10) приняты по данным [201].

Таблица 4.9

**Гранулометрический состав грунтов дноуглубления  
ГСХ «Дунай – Черное море» [201]**

	Содержание фракций грунта, %							Плотность, т/м <sup>3</sup>
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25- 0,10 мм	0,10- 0,05 мм	0,05- 0,01 мм	0,01- 0,005 мм	менее 0,005 мм	
Сред.	1,23	22,31	16,17	9,33	17,03	15,49	16,98	1,41
<i>и, см/с</i>	9,59	4,42	1,38	0,32	0,05	0,003	0,0003	-

## Содержание ЗВ в грунтах дноуглубления [201]

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Среднее значение	Диапазоны классов качества	Средний класс
1	Кадмий	мг/кг	$\leq 0,3$	А	А
2	Ртуть	мг/кг	0,05	А	А
3	Свинец	мг/кг	4,24	А-I	А
4	Цинк	мг/кг	84,6	А-III	II
5	Медь	мг/кг	19,6	А-I	А
8	Фенолы	мг/кг	0,3	А	А
9	НП	мг/кг	188	А-III	I

Характеристики отвала:

- диаметр – 1 морская миля (КР = 925 м);
- координаты центра –  $45^{\circ}19'13''$  СШ и  $29^{\circ}51'58''$  ВД;
- средняя глубина ( $H_{CP}$ ) – 20,0 м;
- средняя скорость течения ( $V_{CP}$ ) –  $0,10 \div 0,15$  м/с.

В табл. 4.11 приведены исходные данные и результаты промежуточных расчетов параметров модели для различных фракций грунта.

В упомянутую таблицу не включены данные предварительных расчетов по фракциям грунта с  $u > 1,38$  см/с, так как эти фракции на расстоянии 100-120 м от ТС уже отсутствуют в морской среде (полностью оседают на дно) [200].

Результаты численного эксперимента приведены в табл. 4.12–4.18 и на рис. 4.6–4.11.

Из табл. 4.12 и рис. 4.6 видно, что при  $V_{CP} = 0,10$  м/с значение максимальной концентрации ВВ на КР составит  $62 \text{ мг/дм}^3$ .

Общее количество ВВ, пересекающего КР (табл. 4.13), составит примерно 46 % от общей массы ВВ, образовавшегося в водной среде в ТС. Все фракции ВВ с  $u \geq 0,32$  см/с не будут вынесены за пределы КР.

## Исходные данные

Параметр	Значение параметра при разных $V_{CP}$	
Контрольное расстояние $L$ , м	925	925
Средняя глубина $H$ , м	20,0	20,0
Средняя скорость $V$ , м/с	0,10	0,15
Концентрация ВВ в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	1000	1000
Вертикальный коэффициент турбулентной диффузии $D_B$ , м <sup>2</sup> /с	0,00956	0,0143
Начальный радиус пятна взвеси $R_0$ , м	6,91	6,91
Количество слоев по глубине	15	11
Толщина слоя по глубине $\Delta z$ , м	1,33	1,82
Начальное количество колец в пятне	4	4
Ширина колец $\Delta r$ , м	1,73	1,73
Шаг во времени $\Delta t$ , с	50	50
Параметр $a_1$	0,1601	0,2402
Параметр $a_2$	0,2689	0,2169
Гидравлическая крупность $u_1$ , см/с	1,38	1,38
Содержание фракции в грунте, %	16,17	16,17
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	161,7	161,7
Параметр $f_1$	0,2588	0,1898
Гидравлическая крупность $u_2$ , см/с	0,32	0,32
Содержание фракции в грунте, %	9,33	9,33
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	93,3	93,3
Параметр $f_2$	0,0600	0,0440
Гидравлическая крупность $u_3$ , см/с	0,05	0,05
Содержание фракции в грунте, %	17,03	17,03
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	170,3	170,3
Параметр $f_3$	0,00938	0,00688
Гидравлическая крупность $u_4$ , см/с	0,003	0,003
Содержание фракции в грунте, %	15,49	15,49
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	154,9	154,9
Параметр $f_4$	0,000563	0,000413
Гидравлическая крупность $u_5$ , см/с	0,0003	0,0003
Содержание фракции в грунте, %	16,98	16,98
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	169,8	169,8
Параметр $f_5$	0,0000563	0,0000413
Время пересечения КР, с	9250	6167
Количество интервалов времени до КР	185	123

Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта ( $V_{CP} = 0,10$  м/с)

Номер шага	Расстояние, м	Максимальная концентрация фракции ВВ ( $\text{мг/дм}^3$ ) с различной гидравлической крупностью $u$ (см/с)					$\Sigma$
		$u = 1,38$	$u = 0,32$	$u = 0,05$	$u = 0,003$	$u = 0,0003$	
0	0	161,70	93,30	170,30	154,90	169,80	750,00
5	25	160,31	92,50	168,84	153,57	168,34	743,55
10	50	147,43	85,07	155,28	141,23	154,82	683,83
15	75	130,21	75,14	137,15	124,75	136,75	604,00
20	100	109,59	66,13	120,70	109,79	120,35	526,56
25	125	69,13	58,60	107,00	97,33	106,69	438,74
30	150	28,35	52,35	95,75	87,10	95,48	359,03
35	175	8,03	47,07	86,48	78,67	86,24	306,49
40	200	1,72	42,49	78,75	71,65	78,54	273,16
45	225	0,30	38,43	72,22	65,74	72,06	248,75
50	250	0,05	34,76	66,65	60,70	66,54	228,69
60	300	0,00	28,36	57,64	52,59	57,65	196,24
70	350	0,00	23,01	50,66	46,36	50,83	170,85
80	400	0,00	18,55	45,09	41,43	45,43	150,50
90	450	0,00	14,88	40,54	37,44	41,07	133,92
100	500	0,00	11,88	36,74	34,14	37,46	120,22
110	550	0,00	9,47	33,52	31,37	34,43	108,79
120	600	0,00	7,53	30,75	29,01	31,85	99,15
130	650	0,00	5,98	28,35	26,98	29,63	90,95
140	700	0,00	4,75	26,25	25,21	27,70	83,91
150	750	0,00	3,77	24,38	23,66	26,01	77,83
160	800	0,00	3,00	22,73	22,28	24,51	72,52
170	850	0,00	2,38	21,24	21,06	23,17	67,85
180	900	0,00	1,90	19,91	19,96	21,97	63,73
185	925	0,00	1,69	19,29	19,45	21,41	<b>61,84</b>

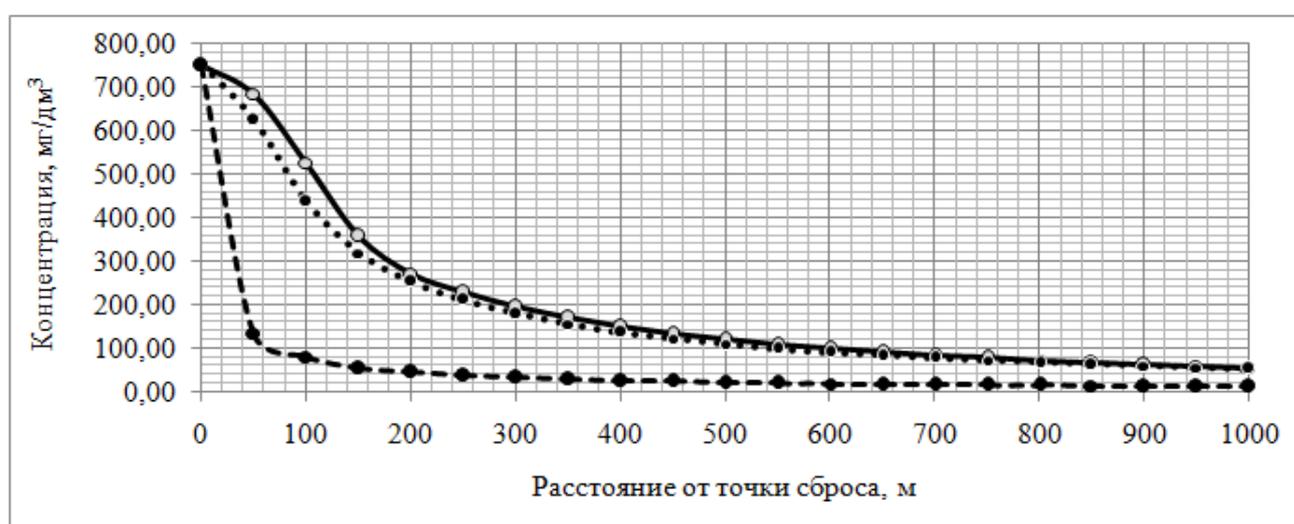


Рис. 4.6. Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта ( $V_{CP} = 0,10$  м/с): сплошная линия – максимальная в облаке; точечная – средняя в центре по глубине; пунктир – средняя в облаке.

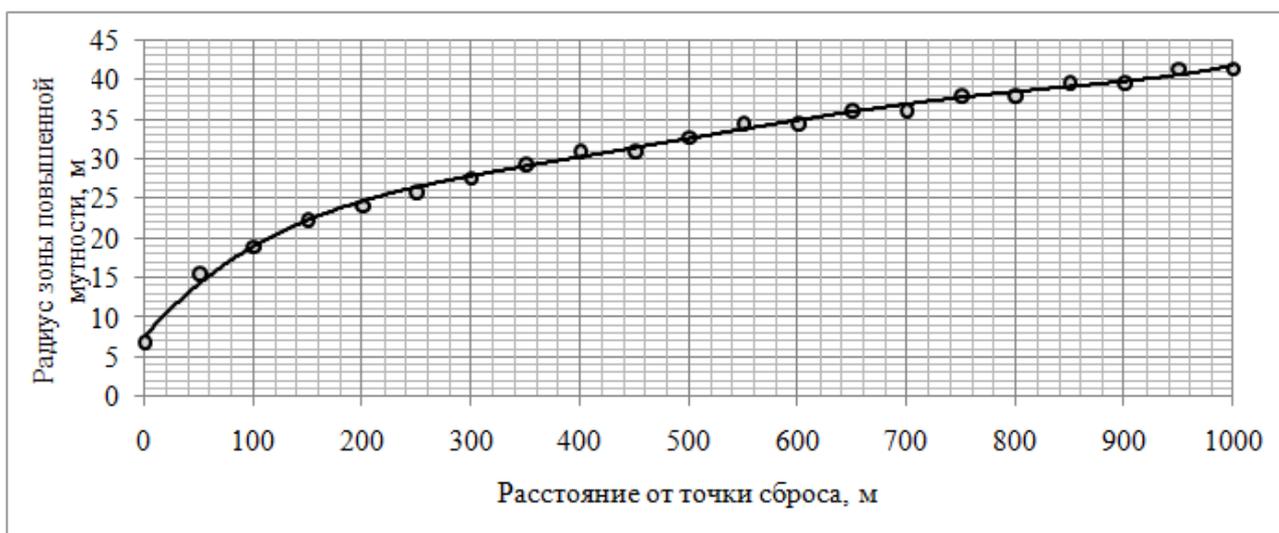


Рис. 4.7. Изменение радиуса зоны повышенной мутности при нормативе  $0,75 \text{ мг/дм}^3$  ( $V_{CP} = 0,10 \text{ м/с}$ ).

Таблица 4.13

**Расчет количества ВВ на КР ( $V_{CP} = 0,10 \text{ м/с}$ )**

№ п/п	Фракция ВВ, мм	$u$ , см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса ( $M$ ) фракции ВВ на КР	
				$M$ , % от массы фракции в ТС	$M$ , % от общей массы ВВ в ТС
1	2 – 1	–	1,46	–	–
2	1 – 0,5	9,59	1,23	–	–
3	0,50 – 0,25	4,42	22,31	–	–
4	0,25 – 0,10	1,38	16,17	–	–
5	0,10 – 0,05	0,32	9,33	6,48	0,61
6	0,05 – 0,01	0,05	17,03	77,55	13,21
7	0,01 – 0,005	0,003	15,49	98,61	15,27
8	< 0,005	0,0003	16,98	99,86	16,96
$\Sigma$			100,0	–	<b>46,05</b>

Характеристики зоны повышенной мутности на КР ( $V_{CP} = 0,10 \text{ м/с}$ ):

- максимальная концентрация ВВ в облаке –  $62 \text{ мг/дм}^3$ ;
- средняя по глубине концентрация ВВ в центре –  $58 \text{ мг/дм}^3$ ;
- средняя концентрация ВВ облаке –  $13 \text{ мг/дм}^3$ ;
- общее количество ВВ в % от исходного – 46;
- радиус зоны загрязнения по ВВ (рис. 4.7) –  $40 \div 43 \text{ м}$ ;
- площадь зоны загрязнения по ВВ –  $5000 \div 5800 \text{ м}^2$ ;
- кратность разбавления растворенных веществ – 7,9.

Таблица 4.14

**Концентрация ЗВ в водной среде на КР ( $V_{CP} = 0,10$  м/с)**

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	≤ 0,3	0,00030	0,0000	0,01	в норме
2	Ртуть	0,05	0,00005	0,00001	0,0001	в норме
3	Свинец	4,24	0,00424	0,0005	0,01	в норме
4	Цинк	84,6	0,08460	0,0107	0,05	в норме
5	Медь	19,6	0,01960	0,00247	0,005	в норме
6	Железо	–	0,00000	0,0000	0,05	в норме
7	Марганец	–	0,00000	0,0000	0,05	в норме
8	Хром	–	0,00000	0,000	0,02	в норме
9	НП	188	0,18800	0,0237	0,05	в норме
10	Фенолы	0,3	0,00030	0,00004	0,001	в норме
11	ВВ	–	1000	61,84	0,75	не соответств. норме

Концентрации ЗВ в морской среде на КР (табл. 4.14) не превышают ПДК, за исключением ВВ (максимальная концентрация 61,8 мг/дм<sup>3</sup> при нормативе 0,75 мг/дм<sup>3</sup>).

При  $V_{CP} = 0,15$  м/с максимальная концентрация ВВ (табл. 4.15, рис. 4.8) составит 66 мг/дм<sup>3</sup>. За пределы КР (табл. 4.16) будет вынесено 49 % ВВ от его общего количества, попавшего в водную среду после сброса грунта.

Таблица 4.15

**Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта ( $V_{CP} = 0,15$  м/с)**

Номер шага	Расстояние, м	Максимальная концентрация фракции ВВ (мг/дм <sup>3</sup> ) с различной гидравлической крупностью $u$ (см/с)					Σ
		$u = 1,38$	$u = 0,32$	$u = 0,05$	$u = 0,003$	$u = 0,0003$	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
0	0	161,70	93,30	170,30	154,90	169,80	750,00
5	38	156,06	90,05	164,36	149,50	163,88	723,85
10	75	129,92	74,97	136,83	124,46	136,43	602,62
15	113	105,85	61,84	112,89	102,68	112,56	495,81
20	150	77,95	52,09	95,15	86,55	94,87	406,60
25	188	46,79	44,72	81,93	74,53	81,70	329,68
30	225	22,97	38,92	71,80	65,34	71,63	270,66

1	2	3	4	5	6	7	8
35	263	9,65	34,17	63,83	58,12	63,71	229,48
40	300	3,61	30,18	57,40	52,31	57,34	200,84
45	338	1,25	26,74	52,10	47,54	52,12	179,74
50	375	0,40	23,76	47,65	43,56	47,76	163,13
55	413	0,13	21,14	43,87	40,18	44,06	149,38
60	450	0,04	18,83	40,62	37,29	40,90	137,67
65	488	0,01	16,79	37,78	34,78	38,15	127,51
70	525	0,00	14,98	35,29	32,59	35,75	118,61
75	563	0,00	13,37	33,08	30,65	33,63	110,74
80	600	0,00	11,95	31,11	28,93	31,75	103,74
85	638	0,00	10,69	29,33	27,39	30,07	97,48
90	675	0,00	9,56	27,73	26,01	28,55	91,86
95	713	0,00	8,56	26,28	24,76	27,18	86,78
100	750	0,00	7,68	24,96	23,62	25,94	82,18
105	788	0,00	6,88	23,74	22,58	24,80	78,00
110	825	0,00	6,18	22,63	21,62	23,76	74,19
115	863	0,00	5,55	21,60	20,75	22,80	70,70
120	900	0,00	4,99	20,65	19,94	21,92	67,49
123	925	0,00	4,68	20,11	19,48	21,42	<b>65,69</b>

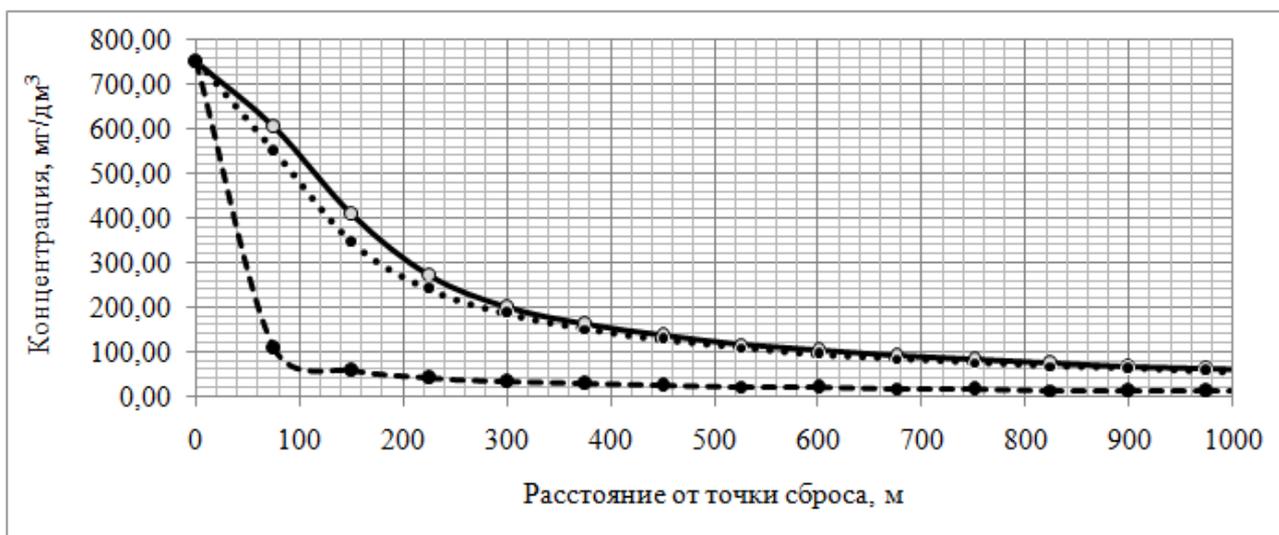


Рис. 4.8. Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта ( $V_{CP} = 0,15$  м/с): сплошная линия — максимальная в облаке; точечная — средняя в центре по глубине; пунктир — средняя в облаке.

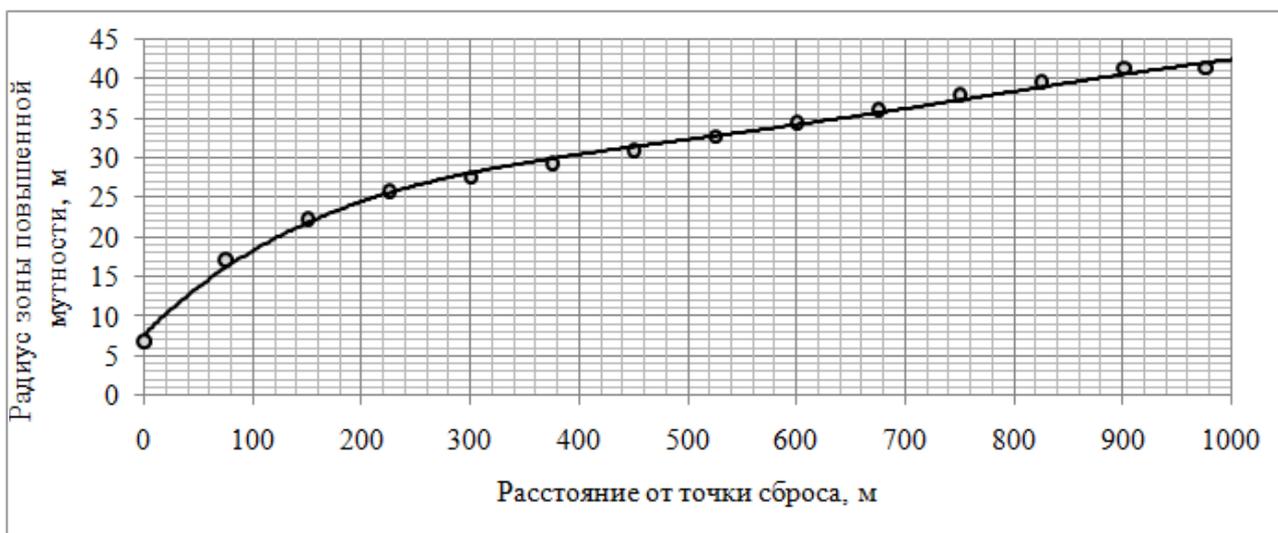


Рис. 4.9. Изменение радиуса зоны повышенной мутности при нормативе  $0,75 \text{ мг/дм}^3$  ( $V_{CP} = 0,15 \text{ м/с}$ ).

Таблица 4.16

**Расчет количества ВВ на КР ( $V_{CP} = 0,15 \text{ м/с}$ )**

№ п/п	Фракция ВВ, мм	$u$ , см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса ( $M$ ) фракции ВВ на КР	
				$M$ , % от массы фракции в ТС	$M$ , % от общей массы ВВ в ТС
1	2 – 1	–	1,46	–	–
2	1 – 0,5	9,59	1,23	–	–
3	0,50 – 0,25	4,42	22,31	–	–
4	0,25 – 0,10	1,38	16,17	–	–
5	0,10 – 0,05	0,32	9,33	22,61	2,11
6	0,05 – 0,01	0,05	17,03	84,90	14,46
7	0,01 – 0,005	0,003	15,49	99,08	15,35
8	< 0,005	0,0003	16,98	99,91	16,96
Σ			100,0	–	<b>48,88</b>

Характеристики зоны повышенной мутности на КР ( $V_{CP} = 0,15 \text{ м/с}$ ):

- максимальная концентрация ВВ в облаке –  $66 \text{ мг/дм}^3$ ;
- средняя концентрация ВВ по глубине в центре –  $62 \text{ мг/дм}^3$ ;
- средняя концентрация ВВ в облаке –  $13 \text{ мг/дм}^3$ ;
- общее количество ВВ в % от исходного – 49;
- радиус зоны загрязнения по ВВ (рис. 4.9) –  $40 \div 43 \text{ м}$ ;
- площадь зоны загрязнения по ВВ –  $5000 \div 5800 \text{ м}^2$ ;
- кратность разбавления растворенных веществ – 7,9.

**Концентрация ЗВ в водной среде на КР ( $V_{CP} = 0,15$  м/с)**

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	≤ 0,3	0,00030	0,0000	0,01	в норме
2	Ртуть	0,05	0,00005	0,00001	0,0001	в норме
3	Свинец	4,24	0,00424	0,0005	0,01	в норме
4	Цинк	84,6	0,08460	0,0107	0,05	в норме
5	Медь	19,6	0,01960	0,00247	0,005	в норме
6	Железо	–	0,00000	0,0000	0,05	в норме
7	Марганец	–	0,00000	0,0000	0,05	в норме
8	Хром	–	0,00000	0,000	0,02	в норме
9	НП	188	0,18800	0,0237	0,05	в норме
10	Фенолы	0,3	0,00030	0,00004	0,001	в норме
11	Взвесь	–	1000	65,69	0,75	не соответств. норме

Концентрации ЗВ в морской среде на КР (табл. 4.17) не превышают ПДК, за исключением ВВ (максимальная концентрация 65,7 мг/дм<sup>3</sup> при нормативе 0,75 мг/дм<sup>3</sup>).

Выполненные расчеты для ГСХ «Дунай – Черное море» показали, что в рассматриваемом районе сезонная изменчивость средней скорости течения от 0,10 до 0,15 м/с не сказывается на рассеянии ЗВ в водной среде: отличие характеристик зоны повышенной мутности на КР при этих значениях скорости течения находится в пределах точности расчетов (не более 6 – 7 %).

За пределы КР не будут выноситься фракции ВВ с гидравлической крупностью  $\geq 0,32$  см/с, содержание которых в ТС составляет примерно 50 %. Таким образом, весь материал, снижение концентрации (самоочищение) которого в водной среде происходит за счет осаждения на дно, не будет выноситься далее 900 – 950 м от ТС.

Количество ВВ, которое пересечет КР, будет находиться в пределах 45 – 50 % от его общего количества, попавшего в водную среду в ТС. Это ВВ будет представлено фракциями с гидравлической крупностью не более 0,05 см/с. Самоочищение водной среды от такого ВВ происходит за счет диффузии.

В табл. 4.18 приведены результаты расчета концентрации полидисперсного ВВ в центре пятна и его радиуса (при нормативе  $0,75 \text{ мг/дм}^3$ ) в различные моменты времени после пересечения КР.

Таблица 4.18

**Концентрация в центре и радиус зоны повышенной мутности  
в разные моменты времени после сброса грунта**

Время, мин.	$V_{CP} = 0,10 \text{ м/с}$		Время, мин.	$V_{CP} = 0,15 \text{ м/с}$	
	$C_{MAX}, \text{ мг/дм}^3$	$r_3, \text{ м}$		$C_{MAX}, \text{ мг/дм}^3$	$r_3, \text{ м}$
154	57,31	41,5	103	59,00	41,5
164	53,77	41,5	113	53,80	41,5
174	50,61	41,5	123	49,40	43,2
184	47,78	43,2	133	45,63	44,9
194	45,23	43,2	143	42,37	44,9
204	42,92	44,9	153	39,52	46,7
214	40,82	44,9	163	37,01	48,4
224	38,90	46,7	173	34,78	48,4
234	37,13	46,7	183	32,79	50,1
254	34,01	48,4	203	29,38	51,8
274	31,34	50,1	223	26,56	53,6
294	29,02	50,1	243	24,21	55,3
314	27,00	51,8	263	22,21	55,3
354	23,63	53,6	303	18,99	58,7
404	20,36	55,3	353	16,00	62,2
454	17,81	58,7	403	13,76	63,9
504	15,78	60,5	453	12,02	65,7
554	14,12	62,2	503	10,64	67,4
604	12,75	63,9	553	9,51	69,1
654	11,60	63,9	603	8,58	70,8
754	9,77	67,4	703	7,13	74,3
854	8,39	69,1	803	6,06	76,0
954	7,33	70,8	903	5,25	77,8
1054	6,48	72,6	1003	4,61	79,5
1154	5,79	74,3	1103	4,09	81,2
1354	4,74	76,0	1303	3,33	81,2
1554	3,99	77,8	1503	2,78	82,9
1754	3,43	77,8	1703	2,38	82,9
1954	3,00	79,5	1903	2,07	81,2
2154	2,65	79,5	2103	1,82	79,5
2350	2,38	79,5	2299	1,63	77,8

Через 10 часов после сброса концентрация полидисперсного ВВ в центре пятна повышенной мутности снизится (рис. 4.10) примерно в 100 раз и будет равна 8–12 мг/дм<sup>3</sup> при средней концентрации 4 мг/дм<sup>3</sup>. Радиус пятна (рис. 4.11) составит примерно 60–70 м. Максимальный радиус пятна (75–85 м) будет наблюдаться примерно через 25–30 часов, максимальная концентрация ВВ в нем будет составлять 3–4 мг/дм<sup>3</sup>, а средняя – 1–2 мг/дм<sup>3</sup>.

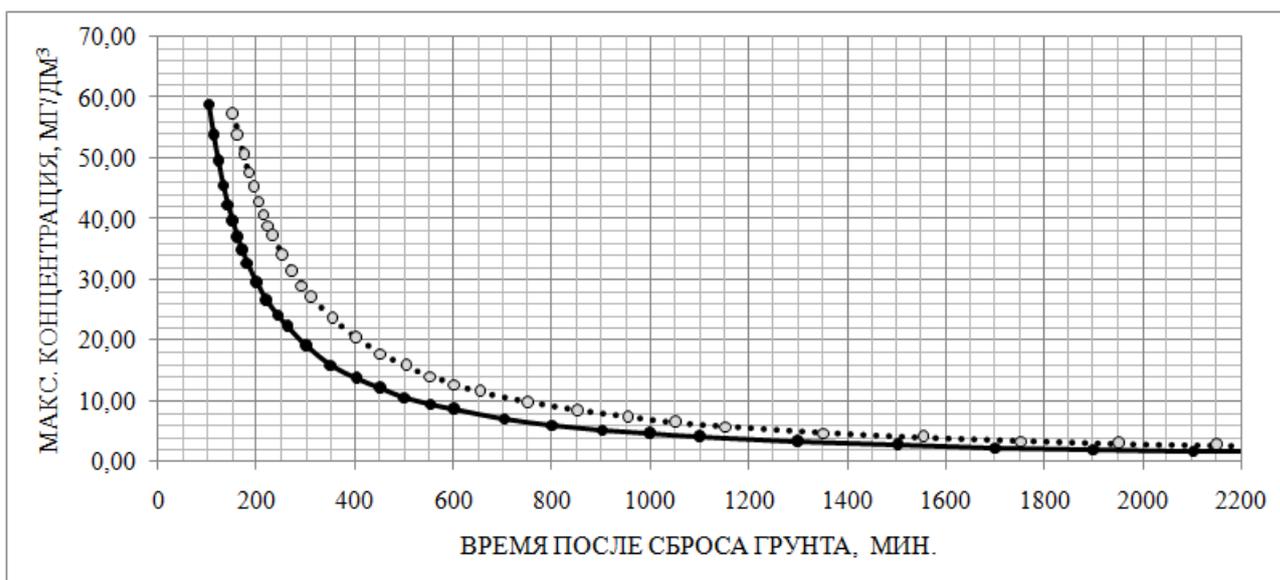


Рис. 4.10. Снижение концентрации полидисперсного ВВ во времени при сбросе грунта: сплошная линия –  $V_{CP} = 0,15$  м/с; точечная –  $V_{CP} = 0,10$  м/с.

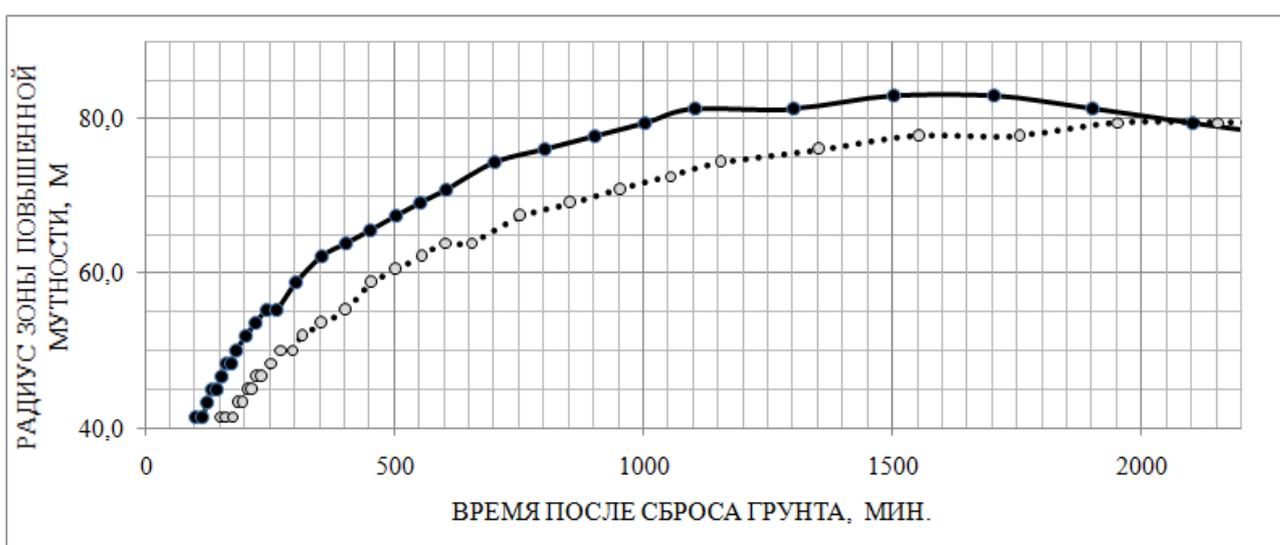


Рис. 4.11. Изменение радиуса зоны повышенной мутности во времени: сплошная линия –  $V_{CP} = 0,15$  м/с; точечная –  $V_{CP} = 0,10$  м/с.

## 4.5. Исследование распространения крупных фракций взвеси

Воспользуемся исходными данными п. 4.3 и исследуем распространение крупных фракций ВВ. В табл. 4.19 приведены исходные данные и результаты промежуточных расчетов параметров модели для фракций ВВ с  $u \geq 4,42$  см/с, выполненных аналогично приведенным ранее расчетам для точки I (п. 4.3).

Таблица 4.19

## Исходные данные

Параметр	Значение параметра в точке III
Контрольное расстояние $L$ , м	900
Средняя глубина $H$ , м	25,0
Средняя скорость $V$ , м/с	0,15
Концентрация ВВ в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	600
Вертикальный коэф. турбулентной диффузии $D_B$ , м <sup>2</sup> /с	0,0179
Начальный радиус пятна взвеси $R_0$ , м	5,64
Толщина слоя по глубине $\Delta z$ , м	0,5 (0,25*)
Ширина колец $\Delta r$ , м	1,88
Шаг во времени $\Delta t$ , с	6 (1,5*)
Гидравлическая крупность $u_1$ , см/с	4,42
Содержание фракции в грунте, %	5,0
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	30,0
Параметр $f_1$	0,2652
$\Delta z_{ПР}$ , м	<b>0,80</b>
Параметр $a_1$	0,0304
Параметр $a_2$	0,4302
Гидравлическая крупность $u_2$ , см/с	9,59
Содержание фракции в грунте, %	4,0
Концентрация фракции в ТС, мг/дм <sup>3</sup>	24,0
Параметр $f_2$	0,2877
$\Delta z_{ПР}$ , м	<b>0,37</b>
Параметр $a_1$	0,0076
Параметр $a_2$	0,4302
Время пересечения КР, с	6000

Примечание: \* – параметры модели для фракции ВВ с  $u = 9,59$  см/с

В табл. 4.20 приведены результаты расчета осредненной по вертикали ( $C_{CP}$ ) и максимальной ( $C_{MAX}$ ) концентраций полидисперсного ВВ и радиуса ( $r_3$ )

зоны повышенной мутности (при нормативе  $0,75 \text{ мг/дм}^3$ ) в различные моменты времени после сброса грунта в перспективной точке III [202].

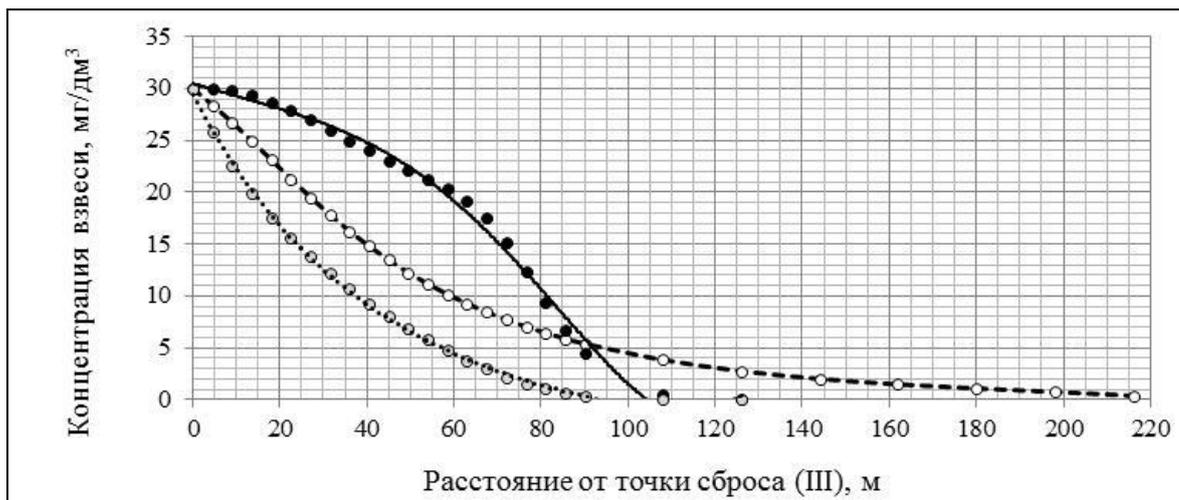
Таблица 4.20

**Значения концентрации ВВ и радиуса зоны повышенной мутности  
частицами фракции ВВ в разные моменты времени после сброса грунта**

t, мин	Рас- стоя- ние, м	u = 4,42 см/с					u = 9,59 см/с				
		в пространстве			в плоскости		в пространстве			в плоскости	
		C <sub>CP</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	C <sub>МАХ</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	r <sub>з</sub> , м	C <sub>МАХ</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	r <sub>з</sub> , м	C <sub>CP</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	C <sub>МАХ</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	r <sub>з</sub> , м	C <sub>МАХ</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	r <sub>з</sub> , м
0,0	0,0	30,00	30,00	5,64	30,00	5,64	24,00	24,00	5,64	24,00	5,64
0,5	4,5	25,83	29,98	7,52	28,42	7,52	19,35	23,97	7,52	21,34	7,52
1,0	9,0	22,56	29,78	7,52	26,76	7,52	15,59	23,79	7,52	18,86	7,52
1,5	13,5	19,87	29,33	9,40	24,98	9,40	12,42	23,43	9,40	16,53	7,52
2,0	18,0	17,57	28,68	9,40	23,14	9,40	9,66	22,90	9,40	14,37	9,40
2,5	22,5	15,56	27,86	9,40	21,31	9,40	7,21	22,26	9,40	12,41	9,40
3,0	27,0	13,77	26,95	9,40	19,53	9,40	5,01	21,54	9,40	10,67	9,40
3,5	31,5	12,15	25,98	11,28	17,84	9,40	3,00	20,53	9,40	9,14	9,40
4,0	36,0	10,67	25,00	11,28	16,26	9,40	1,30	15,53	9,40	7,82	9,40
4,5	40,5	9,31	24,02	11,28	14,81	11,28	0,33	6,07	9,40	6,68	9,40
5,0	45,0	8,05	23,07	11,28	13,48	11,28	0,05	1,12	3,76	5,71	9,40
5,5	49,5	6,88	22,15	11,28	12,26	11,28	0,00	0,11	0,00	4,87	9,40
6,0	54,0	5,79	21,27	11,28	11,16	11,28	0,00	0,007	0,00	4,16	9,40
6,5	58,5	4,77	20,34	11,28	10,17	11,28	0,00	0,00	0,00	3,56	9,40
7,0	63,0	3,82	19,17	13,16	9,27	11,28	0,00	0,00	0,00	3,04	7,52
7,5	67,5	2,96	17,49	13,16	8,45	11,28	0,00	0,00	0,00	2,61	7,52
8,0	72,0	2,20	15,17	13,16	7,72	11,28	0,00	0,00	0,00	2,23	7,52
8,5	76,5	1,56	12,36	13,16	7,05	11,28	0,00	0,00	0,00	1,92	7,52
9,0	81,0	1,05	9,41	11,28	6,45	11,28	0,00	0,00	0,00	1,64	7,52
9,5	85,5	0,68	6,71	11,28	5,91	11,28	0,00	0,00	0,00	1,41	5,64
10,0	90,0	0,42	4,49	11,28	5,41	11,28	0,00	0,00	0,00	1,22	5,64
12,0	108,0	0,04	0,54	0,00	3,85	11,28	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00
14,0	126,0	0,00	0,04	0,00	2,77	9,40	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
16,0	144,0	0,00	0,00	0,00	2,02	9,40	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
18,0	162,0	0,00	0,00	0,00	1,49	7,52	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
20,0	180,0	0,00	0,00	0,00	1,10	5,64	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
22,0	198,0	0,00	0,00	0,00	0,76	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,0	216,0	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Изменения концентрации на различном удалении от ТС грунта в перспективной точке III представлены на рис. 4.12.

а)



б)



Рис. 4.12. Изменение концентрации ВВ с  $u = 4,42$  см/с (а) и  $u = 9,59$  см/с (б):

$C_{CP}$  – точечная линия;  $C_{MAX}$  в пространстве – сплошная;  $C_{MAX}$  в плоскости – пунктир.

Из табл. 4.20 и рис. 4.12 видно, что значения  $C_{MAX}$  и  $C_{CP}$  крупных фракций ВВ в пространственной постановке задачи существенно отличаются от значений  $C_{MAX}$  этих фракций в плоской постановке. Это происходит вследствие того, что в плоской постановке задачи не учитывается неравномерное распределение ВВ по глубине и турбулентный обмен ВВ между слоями.

Крупные фракции ВВ неравномерно распределены по глубине, на это указывает существенное отличие  $C_{MAX}$  от  $C_{CP}$  (сплошная и точечная линии на рис. 4.12). В результате на удалении до 40 м (фракция с  $u = 9,59$  см/с) и до 80 м (фракция с  $u = 4,42$  см/с) от ТС  $C_{MAX}$  в плоской постановке значительно меньше

$C_{MAX}$  и больше  $C_{CP}$  в пространственной постановке. Отсутствие учета турбулентного обмена в плоской постановке задачи приводит к значительному завышению времени пребывания крупных фракций ВВ в водной среде. В плоской постановке  $C_{MAX}$  больше 0 на расстоянии до 220 м от ТС. В то время как в пространственной постановке это расстояние составляет 50 м для фракций ВВ с  $u = 9,59$  см/с и 100 м для фракций ВВ с  $u = 4,42$  см/с.

На рис. 4.13 приведено изменение радиуса зоны повышенной мутности частицами фракции ВВ с  $u = 4,42$  см/с (а) и  $u = 9,59$  см/с (б).

а)



б)



Рис. 4.13. Изменение радиуса зоны повышенной мутности частицами ВВ с  $u = 4,42$  см/с (а) и  $u = 9,59$  см/с (б): сплошная линия – в плоской постановке; пунктирная линия – в пространственной.

## 4.6. Учет разной направленности поверхностного и придонного течений

Рассчитаем параметры зоны повышенной мутности для перспективной точки III в Керченском предпроливье (п. 4.3). При этом предположим, что в районе сброса наблюдаются разнонаправленные поверхностные и придонные течения с одинаковыми скоростями [203]. После сброса грунта при наличии разнонаправленных течений верхняя часть образовавшегося облака взвеси перемещается поверхностным течением в одном направлении, а нижняя часть придонным течением – в другом. Предлагаемая модель позволяет отдельно исследовать турбулентную диффузию верхней и нижней частей облака взвеси. В расчетном модуле «Дампинг-взвесь» это задается начальными условиями.

В табл. 4.21 приведен пример ввода исходных данных при однонаправленных и разнонаправленных течениях.

Таблица 4.21

**Пример ввода исходных данных для разных численных экспериментов**

Параметр	Однонаправленные течения	Разнонаправленные течения	
		поверхностное	придонное
Контрольное расстояние $L$ , м	900	900	900
Средняя глубина $H$ , м	25,0	25,0	25,0
Средняя скорость $V$ , м/с	0,15	0,15	0,15
Площадь днищевой двери, м <sup>2</sup>	100	100	100
Начальное количество колец в пятне	3	3	3
Шаг во времени $\Delta t$ , с	60	60	60
Количество слоев по глубине ( $m_0$ )	10	10	10
Количество слоев по толщине облака взвеси ( $m_{0B}$ )	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Номер первого слоя облака взвеси ( $m$ )	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
Номер последнего слоя облака взвеси	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

В табл. 4.22 – 4.24 и на рис. 4.14 приведены результаты расчетов:  $C_{MAX}$  и  $r_3$  на различном удалении от ТС (табл. 4.22); количества ВВ на КР (табл. 4.23); концентрации растворенных веществ на КР (табл. 4.24).

**Изменение концентрации ВВ и радиуса зоны повышенной мутности  
после сброса грунта**

Момент времени	Расстояние, м	Поверхностное течение		Придонное течение	
		$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м
0	0	546,00	5,6	546,00	5,6
10	90	221,40	18,8	262,70	18,8
20	180	111,86	22,6	130,23	22,6
30	270	71,25	26,3	81,49	26,3
40	360	50,22	28,2	57,03	28,2
50	450	37,72	30,1	42,49	30,1
60	540	29,62	32,0	33,08	32,0
70	630	24,05	33,9	26,62	33,9
80	720	20,03	33,9	22,00	35,7
90	810	17,05	35,7	18,58	35,7
100	900	14,80	35,7	15,97	37,6
110	990	13,03	37,6	13,94	37,6
120	1080	11,61	37,6	12,33	39,5
130	1170	10,46	39,5	11,02	39,5
140	1260	9,53	39,5	9,95	39,5
150	1350	8,75	39,5	9,06	41,4
160	1440	8,17	41,4	8,31	41,4
170	1530	7,64	41,4	7,67	41,4
180	1620	7,18	41,4	7,12	41,4
190	1710	6,76	43,3	6,64	43,3
200	1800	6,38	43,3	6,22	43,3

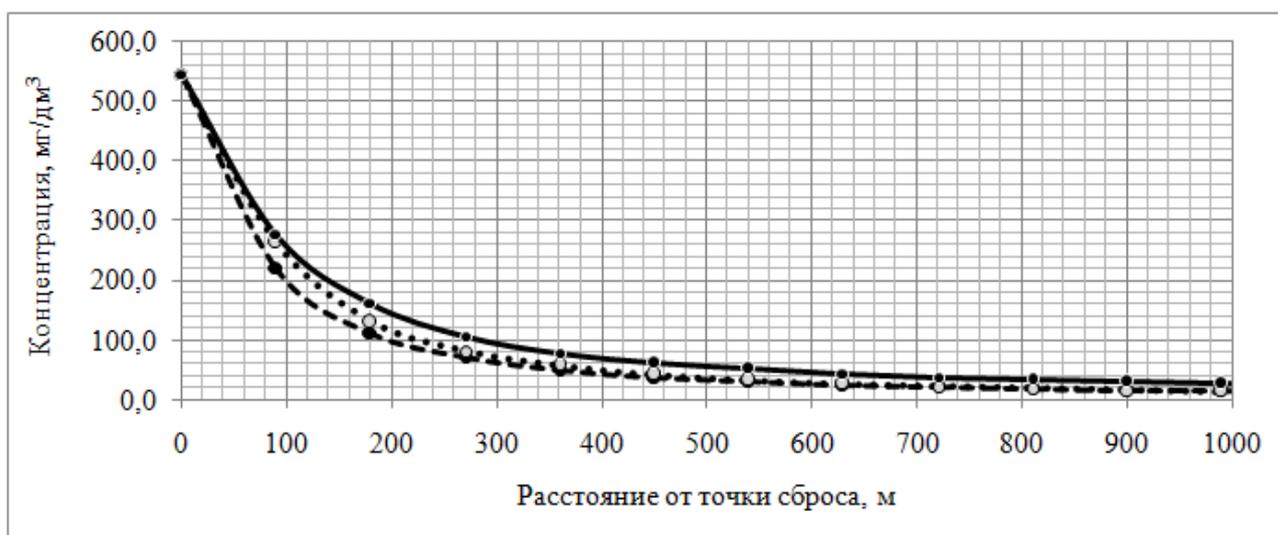


Рис. 4.14. Изменение максимальной концентрации ВВ после сброса грунта: сплошная линия – однонаправленные течения; точечная – придонное течение; пунктир – поверхностное течение.

Таблица 4.23

## Расчет количества ВВ на КР

№ п/п	Фракция ВВ, мм	и, см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса (М) фракции ВВ на КР			
				М, % от массы фракции в ТС		М, % от общей массы ВВ в ТС	
				поверхн.	придон.	поверхн.	придон.
1	1,0 – 0,5	9,59	4,0	–	–	–	–
2	0,50 – 0,25	4,42	5,0	–	–	–	–
3	0,25 – 0,10	1,38	14,0	–	–	–	–
4	0,10 – 0,05	0,32	19,0	23,91	9,26	4,54	1,76
5	0,05 – 0,01	0,05	19,0	47,19	40,92	8,97	7,77
6	0,01 – 0,005	0,003	20,0	49,85	49,43	9,97	9,89
7	< 0,005	0,0003	19,0	49,99	49,94	9,50	9,49
Σ			100,0	–	–	32,98	28,91

Таблица 4.24

## Концентрация ЗВ в водной среде на КР

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС грунта, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>		Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
				поверхн. течение	придон. течение		
1	Кадмий	0,10	0,00006	0,0000	0,0000	0,01	норма
2	Ртуть	0,06	0,00004	0,00000	0,00000	0,0001	норма
3	Свинец	3,25	0,00195	0,0001	0,0001	0,01	норма
4	Цинк	97,1	0,05826	0,0025	0,0025	0,05	норма
5	Медь	32,7	0,01962	0,00085	0,00085	0,005	норма
6	Железо	14050	8,43000	0,367	0,367	0,05	не соответств. норме
7	Марганец	372	0,22320	0,010	0,010	0,05	норма
8	Хром	48,1	0,02886	0,001	0,001	0,02	норма
9	НП	295	0,17700	0,0077	0,0077	0,05	норма
10	Взвесь	–	600	14,8	16,0	0,75	не соответств. норме

В табл. 4.25 сведены результаты расчетов при однонаправленных и разнонаправленных течениях.

Сводная таблица показателей зоны повышенной мутности на КР

Показатель	Однонаправленные течения	Разнонаправленные	
		поверхностное	придонное
Максимальная концентрация ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	29,0	14,8	16,0
Средняя концентрация ВВ в облаке, мг/дм <sup>3</sup>	7,4	4,6	3,7
Общее количество ВВ, % от исходного	61,9	33,0	28,9
Радиус зоны загрязнения по ВВ (при нормативе 0,75 мг/дм <sup>3</sup> ), м	37,6÷41,4	33,9÷37,6	35,7÷39,5
Площадь зоны загрязнения по ВВ, м <sup>2</sup>	4440÷5380	3600÷4440	4010÷4900
Кратность разбавления растворенных веществ	14,1	23,0	23,0
Максимальная концентрация железа, мг/дм <sup>3</sup>	0,60	0,37	0,37

Из табл. 4.25 видно, что при разнонаправленных поверхностном и придонном течениях рассеяние ЗВ в водной среде значительно лучше, чем при течениях в одном направлении: значения  $C_{MAX}$  и  $C_{CP}$  ВВ и ЗВ на КР в 1,6 – 1,9 раза меньше, кратность разбавления растворенных веществ в 1,6 раза больше. Размеры зоны повышенной мутности отличаются мало. Количество ВВ, выносимой за пределы КР, одинаковое ( $33,0 + 28,9 = 61,9$ ).

#### 4.7. Учет формы вертикального сечения облака повышенной мутности после сброса грунта

Некоторые исследователи (например, [5, 204]) вполне логично предполагают, что сразу после сброса грунта за счет его взаимодействия с поверхностью несущего слоя границы облака повышенной мутности в нижних

слоях гораздо шире, чем в верхних слоях (рис. 4.15).

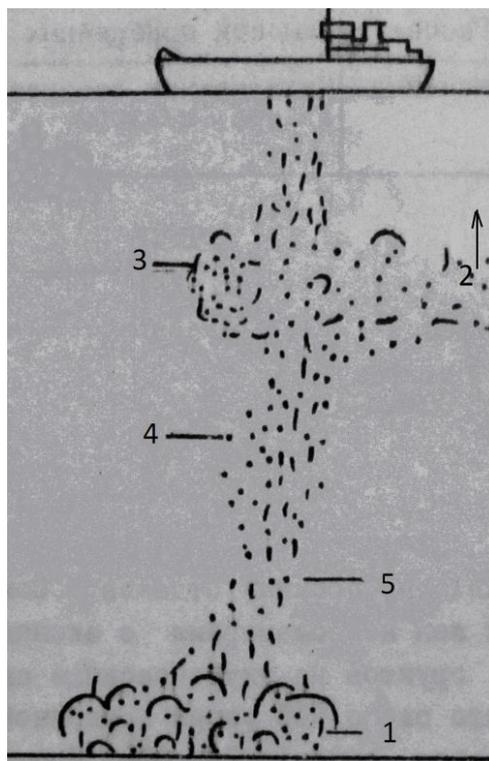


Рис. 4.15. Схема формирования глубоководной свалки:

- 1 – глубина захоронения; 2 – термопикноклин; 3 – участок интенсивного разрушения; 4 – вещество, выпадающее в виде хлопьев; 5 – крупнозернистые фракции материала [204].

Рассчитаем параметры зоны повышенной мутности для перспективной точки III в Керченском предпроливье Черного моря (п. 4.3). При этом будем исходить из предположения, что после сброса вертикальное сечение облака повышенной мутности имеет форму перевернутой буквы «Г». По окончании расчетов сравним эти результаты с полученными ранее результатами (п. 4.3).

В предлагаемой методике форма вертикального сечения облака повышенной мутности после сброса грунта задается начальными условиями. В табл. 4.26 приведен пример ввода исходных данных.

В табл. 4.27 – 4.29 и на рис. 4.16 приведены результаты расчетов:  $C_{MAX}$  и  $r_3$  на различном удалении от ТС (табл. 4.27); концентрации растворенных веществ на КР (табл. 4.28); количества ВВ на КР (табл. 4.29).

Таблица 4.26

**Пример ввода исходных данных для разных численных экспериментов**

Параметр	Форма вертикального сечения облака взвеси после сброса	
	прямоугольник	перевернутая «Т»
Контрольное расстояние $L$ , м	900	900
Средняя глубина $H$ , м	25,0	25,0
Средняя скорость $V$ , м/с	0,15	0,15
Количество слоев по глубине ( $m_0$ )	10	10
Количество верхних слоев	7	7
Начальное количество колец в облаке: в верхних, нижних слоях	3 <b>3</b>	3 <b>6</b>
Количество нижних слоев	3	3
Шаг во времени $\Delta t$ , с	60	60
Концентрация фракции ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	114	114
Гидравлическая крупность, см/с	0,05	0,05

Таблица 4.27

**Изменение концентрации ВВ и радиуса зоны повышенной мутности после сброса**

Момент времени	Расстояние, м	Форма вертикального сечения облака взвеси после сброса			
		прямоугольник		перевернутая «Т»	
		$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м	$C_{MAX}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$r_3$ , м
0	0	546,00	5,6	546,00	11,2
10	90	277,31	18,8	465,57	24,5
20	180	162,24	22,6	309,53	28,2
30	270	106,34	26,3	213,50	32,0
40	360	77,61	30,1	157,87	33,9
50	450	61,69	32,0	123,95	37,6
60	540	51,13	33,9	100,94	39,5
70	630	43,37	35,7	84,26	41,4
80	720	37,42	37,6	71,71	43,3
90	810	32,73	39,5	62,01	43,3
100	900	<b>28,95</b>	<b>39,5</b>	<b>54,36</b>	<b>45,1</b>
110	990	25,87	41,4	48,20	47,0
120	1080	23,32	43,3	43,18	47,0
130	1170	21,18	43,3	39,02	48,9
140	1260	19,36	45,1	35,54	50,8
150	1350	17,81	45,1	32,60	50,8
160	1440	16,48	47,0	30,08	52,7
170	1530	15,31	47,0	27,91	52,7
180	1620	14,29	48,9	26,03	54,6
190	1710	13,40	48,9	24,37	54,6
200	1800	12,60	48,9	22,91	56,4

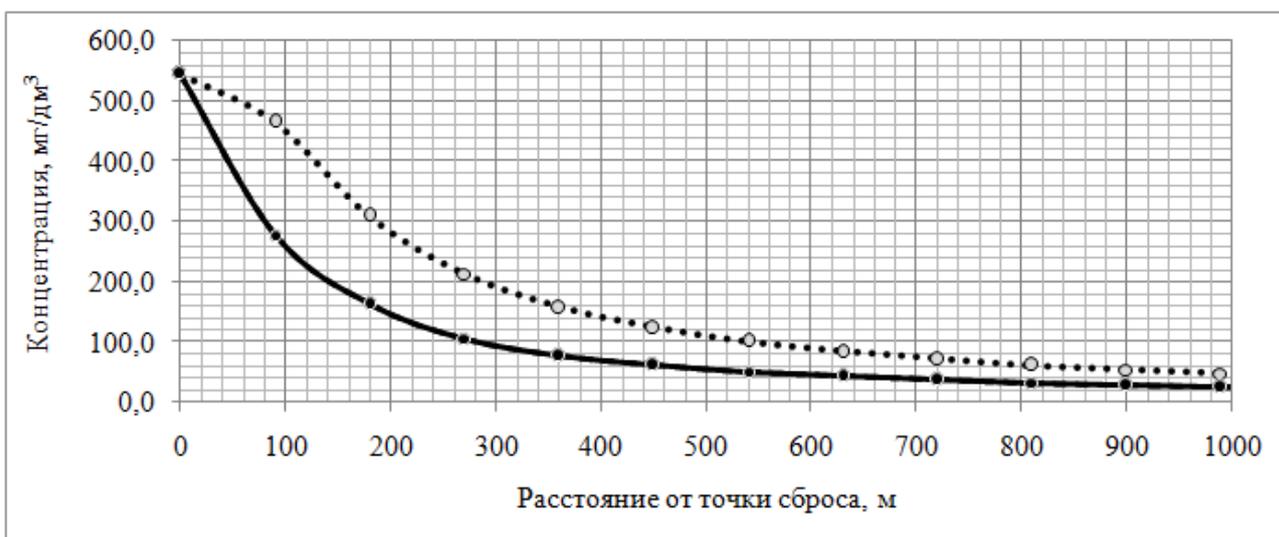


Рис. 4.16. Изменение максимальной концентрации ВВ после сброса грунта:  
точечная линия – сечение в виде перевернутой «Т»;  
сплошная – в виде прямоугольника.

Таблица 4.28

### Концентрация ЗВ на КР

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС грунта, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	0,10	0,00006	0,0000	0,01	в норме
2	Ртуть	0,06	0,00004	0,00001	0,0001	в норме
3	Свинец	3,25	0,00195	0,0003	0,01	в норме
4	Цинк	97,1	0,05826	0,0083	0,05	в норме
5	Медь	32,7	0,01962	0,00281	0,005	в норме
6	Железо	14050	8,43000	1,207	0,05	не соответств. норме
7	Марганец	372	0,22320	0,032	0,05	в норме
8	Хром	48,1	0,02886	0,004	0,02	в норме
9	НП	295	0,17700	0,0254	0,05	в норме
10	ВВ	–	600	54,36	0,75	не соответств. норме

Таблица 4.29

## Расчет количества ВВ на КР

№ п/п	Фракция ВВ, мм	и, см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса (М) фракции ВВ на КР	
				М, % от массы фракции в ТС	М, % от общей массы ВВ в ТС
1	1,0 – 0,5	9,59	4,0	–	–
2	0,50 – 0,25	4,42	5,0	–	–
3	0,25 – 0,10	1,38	14,0	–	–
4	0,10 – 0,05	0,32	19,0	23,73	4,51
5	0,05 – 0,01	0,05	19,0	83,37	15,84
6	0,010 – 0,005	0,003	20,0	98,95	19,79
7	< 0,005	0,0003	19,0	99,90	18,98
Σ			100,0	–	<b>59,12</b>

В табл. 4.30 сведены результаты расчетов при различной форме исходного сечения.

Таблица 4.30

## Сводная таблица показателей зоны повышенной мутности на КР

Показатель	Форма вертикального сечения облака взвеси после сброса	
	прямоугольник	перевернутая «Т»
Максимальная концентрация ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	29,0	54,4
Средняя концентрация ВВ в облаке, мг/дм <sup>3</sup>	7,4	10,4
Общее количество ВВ в ТС, % от прямоугольной формы	100	190
Общее количество ВВ на КР, % от исходного	61,9	59,1
Радиус зоны загрязнения по ВВ (при нормативе 0,75 мг/дм <sup>3</sup> ), м	37,6÷41,4	43,3÷47,0
Площадь зоны загрязнения по ВВ, м <sup>2</sup>	4440÷5380	5878÷6944
Кратность разбавления растворенных веществ	14,1	7,0
Максимальная концентрация железа, мг/дм <sup>3</sup>	0,60	1,21

Из табл. 4.30 видно, что при Т-образной форме начального сечения облака взвеси параметры зоны повышенной мутности на КР значительно

отличаются: значения  $C_{MAX}$  ВВ и ЗВ примерно в 2 раза больше; кратность разбавления растворенных веществ в 2 раза меньше; радиус зоны повышенной мутности на 14 % больше и соответственно площадь – на 31 %.

Количество ВВ, выносимого за пределы КР, в % от исходного количества при Т-образной форме составляет 59 %. Однако, если учесть, что в ТС при такой форме количество ВВ в 1,9 раза больше, чем при прямоугольной форме, то получится, что при Т-образной форме количество ВВ, выносимого за пределы КР, будет больше в  $190 \cdot 0,591 / 61,9 = 1,8$  раза.

#### ***Выводы к разделу 4***

1. Разработанный модуль «Дампинг-взвесь» позволяет получить в различные моменты времени (на различном расстоянии от точки) после сброса: поле концентраций ВВ и ЗВ в вертикальном сечении облака повышенной мутности; значения максимальной, средней по вертикали и средней в облаке концентрации ВВ; размеры (диаметр, площадь и высоту) зоны повышенной мутности; количество ВВ, осевшего на дно.

2. Практическое использование разработанной методики оптимизации дампинга грунтов дноуглубления и разработанного модуля «Дампинг-взвесь» позволили определить из трех перспективных для организации отвала участков акватории МТП «Керчь» оптимальную точку дампинга грунтов – точку III, поскольку рассеяние ЗВ в ней лучше, чем в других точках. Кроме того, взаимное расположение точки III и банки Анисимова (биологически более продуктивного участка) таково, что в результате преимущественного переноса водных масс из Черного моря в Азовское море и наоборот, дампинг грунтов в точке III не будет оказывать влияние на банку Анисимова.

3. Численные эксперименты показали, что сезонная изменчивость средней скорости течения от 0,10 до 0,15 м/с в районе отвала грунта ГСХ Дунай – Черное море не влияет на рассеивающую способность точки: отличие характеристик зоны повышенной мутности на границе полигона при этих значениях скорости течения находится в пределах точности расчетов

(не более 6 – 7 %).

4. Численные эксперименты по исследованию распространения крупных фракций ВВ необходимо выполнять в пространственной постановке задачи, поскольку отсутствие учета вертикального турбулентного перемешивания водных масс в моделях с плоской постановкой задачи приводит к значительному (примерно в 2 раза) увеличению времени пребывания этих фракций ВВ в водной среде.

5. Разнонаправленность поверхностного и придонного течений при дампинге грунтов приводит к лучшему рассеянию ВВ и ЗВ в водной среде: при глубине 25 м кратность разбавления веществ на КР может увеличиться в 2 раза и более.

6. Расширение облака повышенной мутности в придонных слоях в результате взаимодействия грунта дноуглубления с поверхностью несущего слоя после его сброса может привести к существенному увеличению размеров зоны повышенной мутности, а также к увеличению максимальных концентраций ВВ и ЗВ на КР.

## ВЫВОДЫ

Диссертационная работа является завершенным исследованием, направленным на обоснование и разработку методики выбора на акватории украинской части шельфа Черного моря наиболее подходящих с экологической и экономической точек зрения мест отвала грунтов дноуглубления. Основные научно-практические результаты состоят в следующем.

1. Проведенный анализ современных теоретико-методологических подходов к оптимизации дампинга грунтов дноуглубления позволил установить, что для поиска пригодных для дампинга районов на украинской части шельфа Черного моря используется только ГИС «Дампинг». Однако на сегодняшний день отсутствуют методики оптимизации дампинга, которые бы включали экологическую и экономическую составляющие, и методики инженерных расчетов распространения взвеси после сброса грунта.

2. Оптимизацию дампинга грунтов дноуглубления следует выполнять с использованием целевой функции, которая включает экономическую составляющую – приведенные затраты по флоту, связанные с доставкой грунта к отвалу, и экологическую составляющую – ущерб водным биоресурсам, возникающий в результате гибели живых организмов из-за сброса грунта. Оптимальным является вариант с минимумом приведенных затрат.

3. В зависимости от сложившихся условий выбор оптимального решения можно осуществить по минимуму экологического ущерба, если расстояние до отвалов по вариантам отличается незначительно; по максимуму кратности разбавления ЗВ в облаке повышенной мутности на КР от ТС грунта, если расстояние до отвалов и значения гидробиологических показателей в точках их расположения по вариантам отличаются незначительно, и по минимальному расстоянию до места отвала, если значения гидробиологических показателей в точках расположения отвалов по вариантам отличаются незначительно.

4. Разработанный модуль «Дампинг-взвесь», в основу которого положено решение дифференциального уравнения в цилиндрической системе координат, позволяет учесть вертикальный обмен взвесью между слоями водной толщи; разнонаправленность придонных и поверхностных течений; исходную форму вертикального сечения облака взвеси и неравномерность содержания взвеси по глубине в ТС, а также сравнительно легко установить наличие или отсутствие ошибок в алгоритме расчета.

5. Отклонение результатов численного эксперимента по разработанной методике от данных натуральных наблюдений находится в допустимых пределах (не более 15 %) при условии распространения взвеси на небольшом удалении от ТС грунта, при слабом ветровом волнении и при малой скорости течения, что соответствует безопасности работ дноуглубительного флота и характерным особенностям СЗШЧМ.

6. Практическое использование разработанной методики оптимизации дампинга грунтов дноуглубления и модуля «Дампинг-взвесь» позволили определить из трех перспективных для организации отвала участков акватории МТП «Керчь» оптимальную точку дампинга грунтов – точку III, поскольку рассеяние ЗВ в ней лучше, чем в других точках. Кроме того, взаимное расположение точки III и банки Анисимова (биологически более продуктивного участка) таково, что в результате преимущественного переноса водных масс из Черного моря в Азовское море и наоборот, дампинг грунтов в точке III не будет оказывать влияние на банку Анисимова.

7. Численные эксперименты показали, что сезонная изменчивость средней скорости течения от 0,10 до 0,15 м/с в районе отвала грунта ГСХ Дунай – Черное море не влияет на рассеивающую способность точки: отличие характеристик зоны повышенной мутности на границе полигона при этих значениях скорости течения находится в пределах точности расчетов (не более 6 – 7 %).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шаповалов Е. Н. Влияние дампинга грунтов на качество морской среды и биоту / Е. Н. Шаповалов, А. В. Ткалин, В. Л. Климова // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 6. – С. 82–88.
2. Крейда Н. А. Особенности почвообразования на отвалах морских грунтов Северного Причерноморья / Н. А. Крейда, Т. Ю. Арзуманян // Биология и агротехника полевых культур в условиях интенсивного сельскохозяйственного производства. – Одесса : ОСХИ, 1985. – С. 82–89.
3. Крейда Н. А. Рекультивация отвалов морских грунтов в Северном Причерноморье / Н. А. Крейда, Т. Ю. Арзуманян // Почвоведение. – 1990. – № 4. – С. 91–98.
4. Борисов Е. В. Методы оперативного расчета рассеяния взвешенных материалов при сбросах грунта в море / Е. В. Борисов [и др.] // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 63–72.
5. Ватерс К. Экспериментальное сравнение способов удаления грунта самоотвозным землесосным снарядом / К. Ватерс, М. Торн // Технология гидромеханизированных земляных работ. – М. : Транспорт, 1980. – С. 233–250.
6. Гончаров А. А. Некоторые оперативные методы оценки распространения взвеси при сбросе грунта в морскую среду / А. А. Гончаров, А. Ф. Ляшенко // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 124–133.
7. Гончаров А. А. О натуральных исследованиях и моделировании поведения отходов землечерпательных работ при сбросе в море / А. А. Гончаров, А. Ф. Ляшенко // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 41–50.
8. Йохансон Э. Проверка расчетных методик оценки распространения грунта, удаляемого в открытую воду / Э. Йохансон, В. Боемер // Технология

- гидромеханизированных земляных работ. – М. : Транспорт, 1980. – С. 270–283.
9. Кришнапан Б. Распространение грунта, удаляемого в виде компактной массы в глубокую воду / Б. Кришнапан // Технология гидромеханизированных земляных работ. – М. : Транспорт, 1980. – С. 251–269.
  10. Саарсо М. В. Об изменении гранулометрического состава взвеси в поле повышенной мутности, образующемся при дампинге грунтов / М. В. Саарсо, А. А. Гончаров // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 56–63.
  11. Терзиев Ф. С. Организационные и научные принципы контроля за сбросом отходов в морскую среду / Ф. С. Терзиев, И. А. Шлыгин // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 5–15.
  12. Шлыгин И. А. Современное состояние и пути развития механизма регулирования сбросов отходов в море с целью захоронения / И. А. Шлыгин // Труды ГОИН. – 1985. – Вып. 174. – С. 4–24.
  13. Bokuniewicz H. J. Deposition of dredged sediment at open water sites / H. J. Bokuniewicz, R. B. Gordon // Estuarine and coastal marine science. – 1980. – Vol. 10. – № 3. – P. 285–305.
  14. Scubel J. R. Field investigation of the nature, degree and extent of turbidity generated by open-water pipeline disposal operations / J. R. Scubel, H. H. Carter // Tech. Rep. D-78-30, U.S. Army Eng. Waterways Exp. Station, CE, Vicksburg, Miss., 1978. – 115 p.
  15. Gorun V. V. Dumping of dredged soil as a geocological factor of pollution / V. V. Gorun // Фундаментальная и прикладная геологическая наука глазами молодых ученых : достижения, перспективы, проблемы и пути их решения. V Международная научная конференция молодых ученых и студентов. – Баку : Институт Геологии НАН Азербайджана, 2013. – С. 104–106.
  16. Горун В. В. Оцінка впливу скиду ґрунту на водне середовище / В. В. Горун // Матеріали IV Регіональної наукової конференції студентів, магістрів,

аспірантів та молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». – Харків : Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. – С. 47–48.

17. Прозоров А. А. Методика расчета зоны короткопериодного воздействия дампинга грунтов дноуглубления : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 11.00.11 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» / А. А. Прозоров ; Гос. морской проектный ин-т. – СПб., 2000. – 19 с.
18. СанПиН 4630-88 Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/v4630400-88>.
19. Горун В. В. Анализ методик расчета диффузии взвеси в водной среде и разработка новой методики / В. В. Горун // Материалы VIII Международной научной конференции «Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона», 26-27 июня 2013 года. – Керчь : ЮгНИРО, 2013. – С. 39–45.
20. Горун В. В. Аналитические методы расчета распространения взвеси в водной среде / В. В. Горун // Материалы 13-ой Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2013 года : экологические проблемы XXI-го века». – Минск : МГЭУ имени А. Д. Сахарова, 2013. – С. 271.
21. Горун В. В. Методы расчета распространения примеси в водной среде / В. В. Горун // Материалы X Всеукраїнської наукової конференції студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнологій», 10-12 квітня 2013 року. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – С. 144.
22. Гончаров А. А. Исследования моделирования процессов рассеяния различных веществ при захоронении отходов в моря и океаны / А. А. Гончаров, А. Ф. Ляшенко, И. А. Шлыгин // Обзорная информация. Серия : океанология. – М : ВНИИГМИ-МЦД, 1982. – 30 с.
23. Wilson R. E. A model for the estimation of the concentrations and spatial extent of suspended sediment plumes / R. E. Wilson // Estuarine and Coastal Marine

- Science. – 1979. – Vol. 9. – № 1. – P. 65–79.
24. Борисов Е. В. Оперативные методы оценки распределения концентрации загрязняющих веществ в море / Е. В. Борисов // Труды ГОИН, 1980. – Вып. 154. – С. 61–76.
  25. Молдованова Е. Д. Эксплуатационное дноуглубление морских каналов с учетом литодинамических процессов / Е. Д. Молдованова, П. С. Никеров // Исследование влияния гидрометеорологических факторов на строительство и эксплуатацию водных путей и портов. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1987. – С. 43–48.
  26. Беленко С. Л. Выбор технологии разгрузки трюма самоотвозного землесоса с учетом минимального отрицательного воздействия сбросов на морскую среду / С. Л. Беленко, А. Н. Наумов // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 73–78.
  27. Кирильчик С. В. Математическое моделирование процессов распространения взвесей в океане при добыче полезных ископаемых : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / С. В. Кирильчик ; Таганрогский государственный радиотехнический ун-т. – Таганрог, 2010. – 19 с.
  28. Гончаров А. А. Исследование и моделирование процесса распространения взвеси в морской среде при сбросе грунта : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. геогр. наук : спец. 11.00.08 «Океанология» / А. А. Гончаров ; ГОИН. – М., 1986. – 24 с.
  29. Котеров В. Н. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Эффективная гидравлическая крупность полидисперсной взвеси / В. Н. Котеров, Ю. С. Юрезанская // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 2009. – Т. 49. – № 7. – С. 1306–1318.
  30. Котеров В. Н. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Горизонтальное рассеяние / В. Н. Котеров, Ю. С. Юрезанская // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 2010. – Т. 50. –

№ 2. – С. 375–387.

31. Маслаков О. В. Аналіз результатів моделювання переносу домішок в ближній зоні відносно точкового джерела в шельфовій зоні моря / О. В. Маслаков // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2005. – № 49. – С. 368–375.
32. Koh R. C. Y. Mathematical Model for Barged Ocean Disposal of Waters / R. C. Y. Koh, Y. C. Chang // *EPA Report No 660/2-73-029*. – U.S. Environmental Protection Agency, 1973. – 63 p.
33. Brandsma M. G. Development of models for prediction of short-term fate of dredged material discharged in the estuarine environment / M. G. Brandsma, D. J. Divoky // *Tech. Rep. D-76-5, U.S. Army Eng. Wasterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss., 1976*. – 35 p.
34. Johnson B. H. User's guide for models of dredged material disposal in open water / B. H. Johnson // *Tech. Rep. D-90-5, U.S. Army Eng. Wasterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss., 1990*. – 72 p.
35. Ariathurai R. Mathematical model of estuarial sediment transport / R. Ariathurai, R. C. McArthur, R. B. Krone // *Tech. Rep. D-77-12, U.S. Army Eng. Wasterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss., 1977*. – 85 p.
36. Hunt J. N. The turbulent transport of suspended sediment in open channels / J. N. Hunt // *Proc. of the Royal Soc.* – 1954. – A224. – P. 322–335.
37. Kerssens P. J. M. Model for non-steady suspended sediment transport / P. J. M. Kerssens [et al.] // *Proc. 17-th Congr. Int. Assoc. Hydroul., Baden-Baden, 1977*. – Vol. 1. – P. 113–120.
38. Puls W. A numerical approach to solid matter transport computation / W. Puls, J. Sündermann, H. Vollmers // *Proc. 17-th Congr. Int. Assoc. Hydroul., Baden-Baden, 1977*. – Vol. 1. – P. 129–135.
39. Sünderman J. Numerical simulation of tidal caused sand transport in coastal water / J. Sünderman, L. Krohn // *Proc. 17th Congr. Int. Assoc. Hydroul., Baden-Baden, 1977*. – Vol. 9. – P. 173–184.
40. Ariathurai R. Finite element model for cohesive sediment transport /

- R. Ariathurai, R. B. Krone // J. Hyd. Div. ASCE. – 1976. – Vol. 102. – P. 23–28.
41. Шкудова Г. Я. Численная модель циркуляции вод и распространения примеси в глубоком бароклинном море (на примере Черного моря) / Г. Я. Шкудова, Т. З. Джигоев // Труды ГОИН, 1975. – Вып. 126. – С. 92–103.
42. Шкудова Г. Я. Численное моделирование переноса примеси при аварийных выбросах в мелком море / Г. Я. Шкудова // Труды ГОИН, 1975. – Вып. 126. – С. 104–113.
43. Афанасьев С. В. Моделирование распространения примеси в мелких морях и эстуариях : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 11.00.08 «Океанология» / С. В. Афанасьев ; Аркт. и Антаркт. НИИ. – Л., 1986. – 18 с.
44. Трукшане Л. Я. Гидравлические расчеты загрязнения при дампинге грунта в приустьевой части заливов : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология» / Л. Я. Трукшане ; Исследовательский ин-т гидротехники и мелиорации. – М., 1992. – 24 с.
45. Лонин С. А. Моделирование циркуляции и динамики взвешенных частиц в мелководной зоне Черного моря : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 11.00.08 «Океанология» / С. А. Лонин ; Российский ГГИ. – СПб., 1994. – 21 с.
46. Алексеев Д. В. Численное моделирование нестационарных течений, транспорта примеси и взвеси на северо-западном шельфе Черного моря : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 04.00.22 «Геофизика» / Д. В. Алексеев ; Морской гидрофизический институт НАН Украины. – Севастополь, 2008. – 21 с.
47. Бровченко И. А. Трехмерная Лагранжева модель переноса многофракционных наносов и ее применение к описанию гравитационных течений / И. А. Бровченко, В. С. Мадерич // Прикладная гидромеханика. – 2008. – Том 10 (82). – № 1. – С. 3–12.
48. Gils J. Deep water navigation canal Danube Black Sea delft hydraulics prepared

for / J. Gils [and others] // UNECE/ENHS report to the ESPOO Inquiry Commission. – 2014. – February. – 34 p.

49. Демченко Р. И. Численная модель волн, течений и переформирования берегов прибрежной зоны моря / Р. И. Демченко [и др.] // Сборник трудов конференции «Моделирование – 2006». – К., 2006. – С. 197–201.
50. Демченко Р. И. Гидродинамика прибрежной зоны Черного моря в районе устья рук. Быстрый Килийской дельты р. Дунай : 1. Трансформация волн на неоднородностях дна и течениях / Р. И. Демченко [и др.] // Прикладная гидромеханика. – 2006. – Том 8 (80). – № 4. – С. 15–25.
51. Кивва С. Л. Двумерное моделирование дождевого стока и транспорта наносов с малых водосборов / С. Л. Кивва, М. И. Железняк // Прикладная гидромеханика. – 2002. – Том 4 (76). – № 1. – С. 34–43.
52. Корректировка «Проекта на разработку месторождения песков «Сестрорецкое», расположенного в Финском заливе Балтийского моря» в связи с реконструкцией карьера. Инв. № 3595. – СПб., 2012. – 50 с.
53. Мирошниченко В. Г. Эксплуатация морских каналов / В. Г. Мирошниченко. – М. : Транспорт, 1982. – 136 с.
54. Айбулатов Н. А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне / Н. А. Айбулатов. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 274 с.
55. Айбулатов Н. А. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана / Н. А. Айбулатов, Ю. В. Артюхин. – СПб. : Гидрометеиздат, 1993. – 305 с.
56. Берлінський М. А. Екологічні аспекти використання морського середовища : конспект лекцій / М. А. Берлінський. – Одеса : Екологія, 2008. – 88 с.
57. Классификация грунтов дноуглубления Азово-Черноморского бассейна по степени их загрязненности (в пределах Украины). – Одесса : ЧЦД, 1991. – 17 с.
58. Гейдаров Ф. А. Воздействие сбросов грунтов на физико-химические показатели морской воды в начальный период сброса / Ф. А. Гейдаров, С. Ю. Кузнецов // III съезд советских океанологов : тезисы. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – С. 71–72.

59. Севрикова С. Д. Оценка химических последствий сбросов грунтов непосредственно в районе дампинга (на примере мелководной прибрежной зоны Черного моря) / С. Д. Севрикова [и др.] // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 188–205.
60. Гейдаров Ф. А. Влияние дампинга грунтов на гидрохимические показатели морской воды в начальный период сброса (лабораторные эксперименты) / Ф. А. Гейдаров // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 156–168.
61. Мокеева Н. П. Отклик морских биоценозов на сброс грунта / Н. П. Мокеева // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 89–104.
62. Горун В. В. Влияние дампинга грунтов на морскую среду / В. В. Горун // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми Чорного моря». – Одеса : ІНВАЦ, 2012. – С. 107–110.
63. Мокеева Н. П. Влияние сбросов различных отходов в морскую среду на гидробионтов / Н. П. Мокеева // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 23–33.
64. Рубахина М. Е. Некоторые результаты изучения фитопланктона в районе дампинга грунта в Черном море / М. Е. Рубахина // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 141–149.
65. Борисов Е. В. О качестве информации, применяемой для оценки состояния морской среды в районах сброса грунта / Е. В. Борисов // Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. – М. : Гидрометеиздат, 1990. – С. 73–76.
66. Замбриборщ Ф. С. Влияние свала грунта на донные биоценозы / Ф. С. Замбриборщ, А. В. Чернявский, О. Л. Соловьева // Гидробиологический журнал. – 1982. – Т. 18. – Вып. 1. – С. 29–36.
67. Климова В. Л. Оценка последствий сброса грунта по биологическим показателям в районах дампинга в Японском море / В. Л. Климова // Итоги

- исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 137–141.
68. Мокеева Н. П. Влияние сбросов грунта на донную фауну в Рижском заливе / Н. П. Мокеева, Б. В. Межов // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 78–89.
69. Солдатова Т. Ю. Многолетние наблюдения за зообентосом в районе дампинга грунта в Черном море / Т. Ю. Солдатова // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. – М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 149–156.
70. Rosenberg R. Effect of dredging operations on estuarine benthic macrofauna / R. Rosenberg // Mar. Pollut. Bull. – 1977. – Vol. 8. – № 5. – P. 102–104.
71. Ткаченко В. Н. Состояние морских биоценозов в районах дампинга грунтов / В. Н. Ткаченко // Труды ГОИН. – 1985. – Вып. 174. – С. 52–58.
72. Дноуглубительные работы и проблемы охраны рыбных запасов и окружающей среды рыбохозяйственных водоемов. – Астрахань, 1984. – 227 с.
73. Податковий Кодекс України від 2 грудня 2010 р. № 2755-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.
74. Временная методика оценки ущерба, наносимого рыбным запасам в результате строительства, реконструкции и расширения предприятий, сооружений и других объектов и проведения различных видов работ на рыбохозяйственных водоемах. – М. : МРХ ССР, 1989.
75. Шлыгин И. А. Предварительные критерии выбора районов дампинга / И. А. Шлыгин // Труды ГОИН. – 1983. – Вып. 167. – С. 16–22.
76. Шлыгин И. А. Развитие критериев выбора районов дампинга / И. А. Шлыгин // Труды ГОИН. – 1985. – Вып. 174. – С. 36–52.
77. Гончаров А. А. Выбор места сброса грунта с учетом экологически значимых зон на примере Пярнуского залива / А. А. Гончаров, М. А. Кравчук // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. –

- М. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 79–89.
78. Гончаров А. А. Моделирование распространения взвеси при сбросах грунта в морскую среду : информационный бюллетень / А. А. Гончаров. – М. : АН СССР. Координационный центр стран-членов СЭВ, 1984. – № 18. – С. 28–34.
79. Калиниченко В. И. Современная методология выбора участков дампинга грунтов дноуглубления / В. И. Калиниченко, В. Е. Рыжко, В. Н. Кадури // Материалы III Международной конференции «Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона», 10-11 октября 2007 г. – Керчь : ЮгНИРО, 2008. – С. 115–119.
80. Литолого-геологическое изучение территорий возможного дампинга в устьях лиманов Северного Причерноморья : отчет о НИР (закл.) / НПФ «Бюро минеральных ресурсов». – Одесса, 2004. – 58 с.
81. Руководство по организации наблюдений, проведению работ и выдаче разрешений на сброс отходов в море с целью захоронения. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 64 с.
82. Постанова Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1996 р. № 1100 «Про Порядок розроблення і затвердження нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин та перелік забруднюючих речовин, скидання яких нормується» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-%D0%BF>.
83. Обобщенный перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. Утверждено Главрыбводом Минрыбхоза СССР 9 августа 1990 г. под № 12-04-11. – М.: Минрыбхоз СССР, 1990. – 44 с.
84. Горун В. В. Оптимизация дампинга грунтов дноуглубления / В. В. Горун, С. Н. Юрасов // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія : Наук. збірник / Голов. ред. В. К. Хільчевський. – 2015. – Т. 1 (36). – С. 136–144.
85. Инструкция по определению экономической эффективности капитальных

- вложений. РД 31.01.02-77. – М. : В/О Мортехинформреклама, 1977. – 177 с.
86. Техническая инструкция по производству морских дноуглубительных работ. РД 31.74.08-85. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1986. – 172 с.
87. Нормы на морские дноуглубительные работы. РД 31.74.09-86. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1986. – 108 с.
88. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 15 грудня 1994 р. № 116 «Про затвердження Інструкції про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 22 грудня 1994 р. за № 313/523 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0313-94>.
89. Андрианова О. Р. Об особенностях изменчивости основных климатических характеристик Одессы в XX столетии / О. Р. Андрианов, Р. Р. Белевич, М. И. Скипа // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 4. – С. 19–29.
90. Толмазин Д. М. Проблемы динамики вод северо-западной части Черного моря / Д. М. Толмазин, В. А. Шнайман, Ж. М. Ациховская. – К. : Наукова думка, 1969. – 130 с.
91. Єрофєєв Г. О. Аналіз кліматичних геострофічних течій та їх витрат на зональному та меридіональному розрізах акваторії північно-західної частини Чорного моря / Г. О. Єрофєєв, Ю. І. Попов // Український гідрометеорологічний журнал. – 2012. – Вип. 11. – С. 234–240.
92. Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів. – К. : ДУ «Держгідрографія», 2009. – 356 с.
93. Геология шельфа УССР. Среда. История и методика изучения. – К. : Наукова думка, 1982. – 180 с.
94. Доценко С. А. Мінливість основних гідрологічних характеристик Одеського регіону північно-західної частини Чорного моря : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук : спец. 11.00.08 «Океанологія» / С. А. Доценко ; Одес. держ. екол. ун-т. – Одеса, 2003. – 22 с.

95. Блатов А. С. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря : (на примере Южного берега Крыма) / А. С. Блатов, В. А. Иванов. – К. : Наукова думка, 1992. – 242 с.
96. Иванов В. А. Природные условия прибрежной и шельфовой зон Черного моря : функционирование, эволюция, ресурсы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2005. – Вып. 13. – С. 12–41.
97. Демышев С. Г. Численный эксперимент по моделированию синоптических вихрей в Черном море в летний сезон / С. Г. Демышев, Г. К. Коротаев // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 1. – С. 72–83.
98. Овчинников И. М. Новые данные о временной изменчивости течений по результатам многолетних измерений со стабилизированного буя на шельфе Черного моря / И. М. Овчинников, В. Б. Титов, В. Г. Кривошея // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 286. – № 5. – С. 1250–1254.
99. Титов В. Б. О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря и в экологии прибрежной зоны / В. Б. Титов // Океанология. – 1992. – Т. 32. – Вып. 1. – С. 39–48.
100. Добровольский А. Д. Моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. – М. : Изд-во МГУ, 1982. – 166 с.
101. Богуславский С. Г. Физические процессы на поверхности раздела море-атмосфера / С. Г. Богуславский // Системный анализ и моделирование процессов на шельфе Черного моря. – Севастополь : МГИ АН УССР, 1983. – С. 71–77.
102. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2. Черное море / Ильин Ю. П. [и др.]. ; МЧС и НАН Украины, Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. – Севастополь, 2012. – 421 с.
103. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова и Э. И. Альтмана. – СПб. : Гидрометеиздат, 1991. – Т. 4. – 427 с.

104. Справочник по климату Черного моря. – М. : Гидрометеиздат, 1974. – 405 с.
105. Наумова В. А. Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины / В. А. Наумова [и др.] // Труды УкрНИГМИ. – 2010. – Вып. 259. – С. 263–283.
106. Репетин Л. Н. Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения / Л. Н. Репетин, В. Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2009. – Вып. 17. – С. 225–243.
107. Репетин Л. Н. Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря / Л. Н. Репетин, В. Н. Белокопытов // Труды УкрНИГМИ. – Киев, 2008. – Вып. 257. – С. 84–105.
108. Чорне та Азовське море. Глибини та висоти в метрах : карта масштабу 1 : 1 250 000. – К. : ДУ «Держгідрографія», 2008.
109. Авдеев А. И. Морфометрические характеристики и расчлененность рельефа дна северной части Черного моря / А. И. Авдеев, В. Н. Белокопытов // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 4. – С. 43–63.
110. Иванов В. А. Океанография Черного моря / В. А. Иванов, В. Н. Белокопытов. – Севастополь : НГЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 209 с.
111. Емельянов В. А. Геоэкология черноморского шельфа Украины / В. А. Емельянов. – К. : Академперіодика, 2004. – 293 с.
112. Щербаков Ф. А. Осадконакопление на континентальной окраине Черного моря / Ф. А. Щербаков [и др.]. – М. : Наука, 1978. – 210 с.
113. Фесюнов О. Е. Геоэкология северо-западного шельфа Черного моря / О. Е. Фесюнов. – Одесса : Астропринт, 2000. – 100 с.
114. ГП «Ильичевский морской торговый порт». Морской отвал грунтов дноуглубления. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС).

- Рабочий проект / ООО «Научно-технический центр Украинского отделения Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы». – Одесса, 2010. – Т.2. – 81 с. – Арх. № 235/09/4.
115. ДП «Морський торговельний порт «Южний». Реконструкція морського підхідного каналу та внутрішніх водних підходів до глибоководних причалів ДП «Морський торговельний порт «Южний». Морський відвал ґрунтів днопоглиблення. Оцінка впливу морського відвалу ґрунтів днопоглиблення на навколишнє середовище (ОВНС). Робочий проект / ДП «Державний проектно-вишукувальний та науково-дослідний інститут морського транспорту «ЧорноморНДІпроект». – Одеса, 2011. – Т.2. – 69 с. – Арх. № 87734.
116. ДП «Одеський морський торговельний порт». Морський відвал ґрунтів днопоглиблення. Оцінка впливу морського відвалу ґрунтів днопоглиблення на навколишнє середовище (ОВНС). Робочий проект / Науково-виробниче об'єднання «АВІА». – Одеса, 2011. – 76 с. – Арх. № 16416/3.
117. Гідрологічні та гідрохімічні показники стану північно-західного шельфу Чорного моря : довідковий посібник / [відповід. ред. І. Д. Лоева], І. Г. Орлова, М. Ю. Павленко [та ін.]. – К. : КНТ, 2008. – 616 с.
118. Северо-западная часть Черного моря : биология и экология : монография / Под ред. Ю. П. Зайцева, Б. Г. Александрова, Г. Г. Миничевой. – Киев : Наукова думка, 2006. – 701 с.
119. Нестерова Д. А. Исследования фитопланктона Черного моря : обзор / Д. А. Нестерова // Гидробиологический журнал. – 2003. – Вып. 39, № 5. – С. 17–34.
120. Сорокин Ю. И. Черное море. Природа, ресурсы / Ю. И. Сорокин. – М. : Наука, 1982. – 216 с.
121. Теренько Г. В. Видовое разнообразие фитопланктона Черного моря как характеристика состояния экосистемы / Г. В. Теренько // Экология моря. – 2001. – Вып. 58. – С. 53–56.
122. Грезе В. Н. Зоопланктонное сообщество в шельфовой экосистеме /

- В. Н. Грезе // Системный анализ и моделирование процессов на шельфе Черного моря. – Севастополь : МГИ АН УССР, 1983. – С. 132–138.
123. Полищук Л. Н. Некоторые особенности современного развития зоопланктона северо-западной части Черного моря и входящего в него придунайского приустьевоего района / Л. Н. Полищук, Е. В. Настенко // Экосистема взморья украинской дельты Дуная. – Одесса : Астропринт, 1998. – С. 203–244.
124. Синегуб И. А. Состояние макрозообентоса Одесского региона Черного моря в период 1994-1999 гг. / И. А. Синегуб, А. А. Рыбалко // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені В. Гнатюка. Серія : Біологія. Спец. вип. : гідроекологія. – 2001. – С. 157–158.
125. Воробьева Л. В. Мейобентос украинского шельфа Черного и Азовского морей / Л. В. Воробьева. – К. : Наук. думка, 1999. – 300 с.
126. «Режим плавания судов у водах Чорного та Азовського морів» № 402 – нове видання зі змінами та доповненнями до першого видання 2002 р. – К. : ДУ «Держгідрографія», ФДУ «Укрморкартографія», 2006. – 267 с.
127. Розрахунок компенсаційних платежів за забруднення водного середовища від проведення днопоглиблювальних робіт при відновленні та експлуатації ГСХ Дунай – Чорне море в 2011 році : заключний звіт / ЧорноморНДІпроект ; завідуючий НДІ ГДПА В. І. Калініченко ; головний інженер В. В. Патинський. – Одеса, 2011. – 65 с. – Арх. № 88411/А.
128. Ильичевский морской торговый порт. Паспорт акватории / ЧорноморНІІпроект ; руководитель М. Б. Пойзнер ; исполнители : А. Н. Витюков [и др.]. – Одеса, 2012. – 85 с. – Бр. инв. Арх. № 87077.
129. Морской торговый порт Южный. Паспорт акватории / ЧорноморНІІпроект ; руководитель М. Б. Пойзнер ; исполнители : А. Н. Витюков [и др.]. – Одеса, 2009. – 88 с. – Бр. инв. Арх. № 87075.
130. Одесский морской торговый порт. Паспорт акватории / ЧорноморНІІпроект ; руководитель М. Б. Пойзнер ; исполнители :

- А. Н. Витюков [и др.]. – Одеса, 2009. – 83 с. – Бр. инв. Арх. № 87076.
131. Атлас охраны природы Черного и Азовского морей / гл. ред. Л. И. Митин. – СПб. : ГУНиО МО Российской Федерации, 2006. – 434 с.
132. Судовой ход Дунай – Черное море. Морской отвал грунтов дноуглубления. Рабочий проект / Научно-технический центр Украинского отделения Международной академии наук экологии и безопасности человека (НТЦ УО МАНЄБ). – Одесса, 2003. – Т.1. – 52 с. – Арх. № 141/1.
133. Судовой ход Дунай – Черное море. Морской отвал грунтов дноуглубления. Оценка воздействия на окружающую природную среду. Рабочий проект / ИЦ «Ноосфера». – Одесса, 2003. – Т.3. – 61 с. – Арх. № 35/03.
134. Мониторинг за профилактическим дноуглублением лиманной части подходного канала в 2013 году : отчет / Белгород-Днестровский филиал Государственное Предприятие «Администрация морских портов Украины». – Белгород-Днестровский, 2013. – 39 с. – № 13-В-БДФ-13 от 27.11.2013 г.
135. ГП «Ильичевский морской торговый порт». Морской отвал грунтов дноуглубления. Проект. Пояснительная записка / ООО «Научно-технический центр Украинского отделения Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы». – Одесса, 2010. – Т.1. – 38 с. – Арх. № 235/09/3.
136. Одесский морской торговый порт. Мониторинг за гидротехническими и дноуглубительными работами Одесского морского торгового порта в 2008 году : аннотационный отчет за 1 квартал / НПО «АВИА». – Одеса, 2008. – 76 с. – Арх. № А – 01/08/1.
137. Одесский морской торговый порт. Мониторинг за гидротехническими и дноуглубительными работами Одесского морского торгового порта в 2008 году : аннотационный отчет за 4 квартал / НПО «АВИА». – Одеса, 2008. – 68 с. – Арх. № А – 01/08/3.
138. ДП «Одеський морський торговельний порт». Морський відвал ґрунтів днопоглиблення. Проект. Пояснювальна записка та креслення / Науково-

виробниче об'єднання «АВІА». – Одеса, 2011. – Т.1. – 50 с. –  
Арх. № 16416/2.

139. Морской торговый порт Южный. Паспорт внутреннего канала / ЧерноморНИИпроект ; руководитель М. Б. Пойзнер ; исполнители : А. Н. Витюков [и др.]. – Одеса, 2010. – 68 с. – Бр. инв. Арх. № 87325.
140. Морской торговый порт Южный. Паспорт подходного канала / ЧерноморНИИпроект ; руководитель М. Б. Пойзнер ; исполнители : А. Н. Витюков [и др.]. – Одеса, 2009. – 79 с. – Бр. инв. Арх. № 87076.
141. Морской торговый порт Южный. Мониторинг за очисткой от заиления подходного и внутреннего каналов порта Южный в 2007 году / НПО «АВИА». – Одеса, 2006. – 76 с. – Арх. № А – 39/07.
142. Экологический мониторинг дноуглубительных работ при строительстве причала № 9 ГП «МТП Южный» в 2009-2010 г.г. : аннотационный отчет за II квартал / НПО «АВИА». – Одеса, 2009. – 75 с. – Арх. № 28/09/1.
143. Экологический мониторинг дноуглубительных работ при строительстве причала № 9 ГП «МТП Южный» в 2009-2010 г.г. : аннотационный отчет за III квартал / НПО «АВИА». – Одеса, 2009. – 69 с. – Арх. № 28/09/2.
144. Экологический мониторинг дноуглубительных работ при строительстве причала № 9 ГП «МТП Южный» в 2009-2010 г.г. : аннотационный отчет за IV квартал / НПО «АВИА». – Одеса, 2009. – 79 с. – Арх. № 28/09/3.
145. ДП «Морський торговельний порт «Южний». Реконструкція морського підхідного каналу та внутрішніх водних підходів до глибоководних причалів ДП «Морський торговельний порт «Южний». Морський відвал ґрунтів днопоглиблення. Проект. Пояснювальна записка та креслення / ДП «Державний проектно-вишукувальний та науково-дослідний інститут морського транспорту «ЧорноморНДІпроект». – Одеса, 2011. – Т.1. – 34 с. – Арх. № 87733.
146. Кудрик И. Д. Негативные антропогенные факторы, влияющие на состояние экосистемы Керченского пролива / И. Д. Кудрик, В. С. Портной // Материалы Международной научной конференции «Интегрированная

система мониторинга Черного и Азовского морей», 24-27 сентября 2013 г. – Севастополь : Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2013. – С. 271–275.

147. Ломакин П. Д. Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива / П. Д. Ломакин [и др.] // Морской экологический журнал. – 2008. – Т. 7. – № 4. – С. 51–59.
148. Керченский филиал ГП «Администрация морских портов Украины». Технические предложения по выбору местоположения подводного отвала и проект подводного отвала грунтов дноуглубления объектов Керченского филиала ГП «АМПУ». – Одеса, 2014. – Т.3. – 53 с. – Арх. № 90414.
149. ГП «Керченский морской торговый порт». Технические предложения по выбору местоположения подводного отвала и проект подводного отвала грунтов дноуглубления объектов ГП «Керченский морской торговый порт» / ГП «ЧЕРНОМОРНИИПРОЕКТ». – Одесса, 2013. – Т.2. – 48 с. – Арх. № 90413.
150. Юрасов С. Н. Математическая модель неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке / С. Н. Юрасов, В. В. Горун // Метеорологія, кліматологія та гідрологія : Межвід. наук. збірник України / Голов. ред. С. М. Степаненко. – Одеса : Вид-во «ТЕС», 2010. – Вип. 51. – С. 189–199.
151. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А. В. Караушева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 288 с.
152. Антонова Г. М. Сеточные методы равномерного зондирования для исследования и оптимизации динамических стохастических систем / Г. М. Антонова. – М. : Физматлит, 2007. – 224 с.
153. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов [и др.]. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 527 с.
154. Вабищевич П. Н. Численное моделирование / П. Н. Вабищевич. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 152 с.

155. Вержбицкий В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2005. – 848 с.
156. Калиткин Н. Н. Численные методы : учеб. пособ. / Н. Н. Калиткин. – СПб. : БХВ - Петербург, 2011. – 592 с.
157. Самарский А. А. Введение в численные методы : учеб. пособ. для вузов / А. А. Самарский. – СПб. : Лань, 2005. – 288 с.
158. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Ижевск, 2003. – 784 с.
159. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.
160. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 548 с.
161. Самарский А. А. Численные методы : учеб. пособ. для вузов / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 432 с.
162. Самарский А. А. Численные методы математической физики / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Научный мир, 2000. – 316 с.
163. Семененко М. Г. Введение в математическое моделирование / М. Г. Семененко. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 111 с.
164. Колешко С. Б. Механика жидкости и газа. Разностные схемы : учеб. пособ. / С. Б. Колешко, Ф. Д. Попов. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. – 72 с.
165. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем / Дж. Ортега. – М. : Мир, 1991. – 367 с.
166. Юрасов С. Н. Применение конечно-разностных схем при моделировании неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке / С. Н. Юрасов, В. В. Горун // Украинский гидрометеорологический журнал. – 2014. – №14. – С. 172–184.
167. Горун В. В. Методика оценки влияния дампинга грунтов на водную среду / В. В. Горун // Материалы VII Международной науч. конф. «Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона», 20-23 июня 2012 года. – Керчь : ЮгНИРО, 2012. – С. 243–248.

168. Горун В. В. Моделирование переноса взвешенных веществ при залповых сбросах / В. В. Горун // *Материалы Международной молодежной конференции «Измерения, моделирование и информационные системы для изучения окружающей среды»*. – Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2012. – С. 72–77.
169. Gorun V. Dredged material disposal in open water – calculation of suspension diffusion / V. Gorun // *Acta Geographica Silesiana*. – Sosnowiec : WNoZ UŚ, 2013. – № 13. – S. 29–36 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.wnoz.us.edu.pl/ags>.
170. Горун В. В. Методика розрахунку розповсюдження завислої речовини у водному середовищі при залпових скидах / В. В. Горун // *Вода : проблеми і шляхи вирішення : Збірник матеріалів III Всеукраїнської науково-практичної конференції*. – Житомир : Вид-во ЖДУ імені І. Франка, 2010. – С. 27–29.
171. Gorun V. Study of finite difference schemes for modeling of unsteady turbulent diffusion of suspended matter in the aquatic environment / V. Gorun // *European Applied Sciences*. – Stuttgart, Germany : ORT Publishing, 2013. – № 10. – Vol. 1. – P. 35–44.
172. Головашкин Д. Л. Параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений трехдиагонального вида, основанного на методе встречных прогонок / Д. Л. Головашкин // *Математическое моделирование*. – 2005. – Т. 17. – № 11. – С. 118–128.
173. Елизарова Т. Г. Применение многопроцессорных транспьютерных систем для решения задач математической физики / Т. Г. Елизарова, Б. Н. Четверушкин // *Математическое моделирование*. – 1992. – Т. 4. – № 11. – С. 75–100.
174. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики : учеб. пособ. / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1989. – 608 с.
175. Горун В. В. Расчет диффузии взвеси в водной среде при дампинге грунтов / В. В. Горун // *Вісник Харківського національного університету*

імені В. Н. Каразіна. – Харків, 2013. – Вип. 8, № 1054. – С. 95–103.

176. Соціально-екологічна характеристика та захист від паводків в Придунайському регіоні : звіт про НДР (закл.) 30.11.11 / Одеський державний екологічний університет ; керівн. Ю. М. Соколов ; викон. : О. А. Д'яков [та ін.]. – Одеса, 2011. – 109 с. – Інв. № 0111U000224.
177. Горун В. В. Оптимизация параметров математической модели неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водной среде / В. В. Горун, С. Н. Юрасов // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2012. – Вип. 14. – С. 28–35.
178. Горун В. В. Оптимизация параметров математической модели неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке в плоской постановке задачи / В. В. Горун, С. М. Юрасов // Матеріали VII науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Наука. Молодь. Екологія – 2011», 18-19 травня 2011 року. В 2-х томах. – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2011. – Т. 2. – С. 166–171.
179. Горун В. В. Практические рекомендации к расчету распространения взвеси при дампинге грунтов / В. В. Горун, С. М. Юрасов // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Екологічні проблеми природокористування та охорона навколишнього середовища». Збірник наукових праць. – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2013 – С. 59–61.
180. Гильманов А. Н. Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики / А. Н. Гильманов. – М. : Наука, 2000. – 248 с.
181. Захаров А. Г. Моделирование массопереноса в неоднородных структурах твердотельной электроники / А. Г. Захаров [и др.]. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 139 с.
182. Harten A. Uniformly high-order accurate essentially non-oscillatory schemes, III / A. Harten [et al.] // J. Comput. Phys. – 1987. – Vol. 71. – № 2. – P. 231–303.
183. Hassan O. An Implicit / Explicit Scheme for Compressible Viscous High Speed Flows / O. Hassan, R. Morgan, J. Peraire // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1989. – Vol. 76. – № 3. – P. 245–258.

184. Практикум по динамике океана / [Под ред. д-ра геогр. наук А. В. Некрасова, д-ра физ.-мат. наук Е. Н. Пелиновского], В. О. Ивченко [и др.]. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992. – 320 с.
185. Горун В. В. Сопоставление результатов расчетов по модели неустановившейся турбулентной диффузии взвеси с натурными наблюдениями / В. В. Горун // Матеріали XII наукової конференції молодих вчених Одеського державного екологічного університету, 9-13 квітня 2012 року. – Одеса : ТЕС, 2012. – С. 141.
186. Контроль состояния морской экосистемы при ремонтном дноуглублении – сбросе грунта и перегрузки сыпучих грузов в порту Усть-Дунайск : информационный отчет № 2 / Исследовательский центр «Ноосфера». – Одесса, 1998. – 39 с.
187. Изучение влияния дноуглубительных работ и складирования грунта на кормовую базу рыб и ихтиофауну Днепровско-Бугского лимана : отчет (окончательный) / ХГС НАНУ. – Херсон, 2006. – 40 с.
188. Оценка влияния гидротехнических работ на состояние гидроекосистемы Днепровско-Бугской устьевой области : отчет (окончательный) / ХГС НАНУ. – Херсон, 2003. – 53 с.
189. Беленко С. Л. Оценка количества грунта, переходящего во взвешенное состояние при дампинге / С. Л. Беленко, А. А. Прозоров // Проблемы гидротехнического строительства на морском транспорте. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1989. – С. 27–31.
190. Боуден К. Ф. Физическая океанография прибрежных вод / К. Ф. Боуден ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 324 с.
191. Судольский А. С. Динамические явления в водоемах / А. С. Судольский. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 263 с.
192. Океанографические таблицы / Под ред. З. И. Мироненко. – СПб. : Гидрометеиздат, 1975. – 478 с.
193. Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане / Р. В. Озмидов. – Л. : Гидрометеиздат, 1986 – 280 с.

194. Дроздов В. Б. Унифицированная формула гидравлической крупности наносов / В. Б. Дроздов // Исследование влияния гидрометеорологических факторов на строительство и эксплуатацию водных путей и портов. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1987. – С. 37–39.
195. Колдоба А. В. Методы математического моделирования окружающей среды : монография / А. В. Колдоба [и др.]. – М. : Наука, 2000. – 254 с.
196. Winterwerp J. C. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment / J. C. Winterwerp // J. of Hydraulic Research. – 1997. – Vol. 36. – № 3. – P. 309–326.
197. Горун В. В. Методические рекомендации по расчету распространения взвеси при залповых сбросах / В. В. Горун // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2013. – Вип. 15. – С. 177–186.
198. Горун В. В. Инженерная методика расчета распространения взвеси в водной среде (пространственная постановка задачи) / В. В. Горун // Матеріали I Всеукраїнської (з міжнародною участю) наукової конференції студентів, магістрів, аспірантів та молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». – Харків : Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. – С. 61–62.
199. Калиниченко В. И. Практическое использование математической модели неустановившейся турбулентной диффузии взвеси в водном потоке (МТП Керчь) / В. И. Калиниченко, С. Н. Юрасов, В. В. Горун // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2014. – Вип. 18. – С. 5–20.
200. Горун В. В. Оценка масштабов кратковременного воздействия дампинга грунтов дноуглубления на состояние водной среды / В. В. Горун // Матеріали четвертої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Вода : проблеми та шляхи вирішення», 4-7 липня 2013 року. – Житомир : Вид-во ЖДУ імені І. Франка, 2013. – С. 23–26.
201. Розрахунок компенсаційних платежів за забруднення водного середовища від проведення днопоглиблювальних робіт при проведенні та експлуатації

ГСХ Дунай – Чорне море в 2013 році : анотований звіт за 4 квартал 2013 року / ДП «Державний проектно-вишукувальний та науково-дослідний інститут морського транспорту «ЧорноморНДІпроект». – Одеса, 2014. – 73 с. – Арх. № 90156.

202. Горун В. В. Исследование распространения крупных фракций взвеси / В. В. Горун // Материалы международной научной конференции молодых ученых «Современное состояние региональных экологических проблем и пути их решения», 16-18 апреля 2014 г. – Одесса : ТЭС, 2014. – С. 65–67.
203. Горун В. В. Учет разной направленности поверхностного и придонного течений при оценке зоны загрязнения от дампинга грунтов / В. В. Горун // Матеріали VI Всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю «Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології», 20-22 травня 2014 р. – Дніпропетровськ : ТОВ «Акцент ПП», 2014. – С. 67–69.
204. Надворный Н. Н. Гигиенические основы охраны морской среды при дноуглубительных работах / Надворный Н. Н. [и др.]. – Кишинев : Штиинца, 1991. – 139 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А

### Структура и принципы функционирования ГИС «Дампинг» [79, 80]

ГИС «Дампинг» представляет собой комплекс тематических информационных слоев, содержащих собственную оригинальную информацию.

*Целью* создания системы было получение характеристики изучаемых акваторий по некоторой суммарной величине, которая включала бы в себя все основные критерии (гидрологическая структура и динамика вод, режим ветра и ветрового волнения, рельеф дна и характеристика донных отложений, гидрохимические показатели воды, геохимические характеристики донных отложений и грунтов дноуглубления, гидробиологическая характеристика донного биоценоза, навигационная и гидрографическая обстановка), а так же учитывала значимость каждого из них при выборе места дампинга.

*Основными задачами* для достижения поставленной цели были следующие:

1. Охарактеризовать значимость каждого анализируемого признака и определить его весовой вклад в выбор места дампинга.
2. Построить бальную схему каждого признака, определив для нее пределы, метод и детальность интерполяционных процедур.
3. Произвести суммирование всех созданных бальных интерполяционных схем признаков для получения итоговой схемы пригодности территории для дампинга.

#### **1. Характеристика значимости критериев и «весовой» вклад каждого при выборе места дампинга**

К критериям, определенным как основные при выборе места дампинга, относятся: стратификация водной толщи в различные сезоны года, скорости течений и ветров, глубины, геоморфология дна, литология донных отложений,

геохимия донных отложений, распространение биологических форм по площади дна.

Основным методом формализации данных является введение безразмерной величины – балла. Так как значения различных признаков в действительности неодинаковы, появляется необходимость введения понятия веса признака. Вместе с тем, очевидным является и то, что вес признака может изменяться в зависимости от поставленных целей и задач, поэтому именно цель определяет как величину балльной оценки, так и ее ранжированность. Такое ранжирование показателей внутри каждой группы критериев позволяет установить приоритет значимости этих групп критериев и определить критические и предельные совокупности показателей.

Опираясь на принципы оценки веса признаков, каждый из признаков оценен исходя из балльной системы по отношению к его роли и значению в процессе формирования территории дампинга. Последние определяются на основании сформированной базы данных, накопленного опыта и практики проведения дноуглубительных работ и экологического мониторинга за ними.

Рост веса признака определяется его положительным влиянием на условия отвода территории дампинга, снижение – его отрицательным влиянием.

Характерные глубины залегания термоклина и галоклина в условиях исследуемой акватории высоко значимы и, располагаясь на глубинах -7 – -9 м, влекут за собой изменение процессов седиментации. Конвективное влияние зимнего перемешивания положительно влияет на выбор места дампинга. Помимо этого сброс грунтов на глубинах менее 5 метров не рекомендуется, а значительные глубины захоронения грунта приводят к тому, что наиболее тонкодисперсная часть сбрасываемого грунта переходит во взвешенное состояние. Поэтому балльные оценки для критерия глубины были распределены следующим образом: 0 – (-5) м – 0 баллов; (-5) – (-10) м – 40 баллов; (-10) – (-15) м – 30 баллов; (-15) – (-20) м – 20 баллов; более (-20) м – 10 баллов.

Вертикальное распределение слоев и динамика водных масс существенно

влияет на выбор места дампинга. Так как она носит сезонный характер, то соответственно оценивается от 5 до 15 баллов в летне-осенний период и от 15 - 25 в зимне-весенний период.

Учет режима ветра проводится в оценке волнового режима, который напрямую зависит от ветрового влияния.

Вес рельефа дна как признака определяется в первую очередь его формой – возвышенность, склон, плоская поверхность или впадина, и преобладанием той или иной формы рельефа на исследуемой территории. Соотношение было оценено в показателях от 0 (для возвышенностей) до 50 баллов (для депрессивных форм).

Литологический состав донных отложений оценивается в зависимости от сходства с гранулометрическим составом грунтов захоронения. Значения оценок изменяются от 10 (для раковинного материала) через 30 (для песка) до 50 (для илов).

Геохимические параметры влияют на выбор места дампинга в соответствии с совпадением геохимических составляющих грунтов захоронения с донными отложениями. Преимущественная оценка в 5 баллов определена для участков со значительным превышением элемента – загрязнителя в донных отложениях. Нулевое значение характерно для участков, где содержание химического элемента в донных отложениях меньше чем в грунтах дампинга.

Основываясь на карте распространения общей биомассы предложены бальные градации от 50 баллов при биомассе менее  $200 \text{ г/м}^2$  и до 0 баллов при максимальной биомассе до  $2000 \text{ г/м}^2$ . Так же при бальной оценке территории обязательным является учет количества экземпляров зообентосных форм на единице площади в один квадратный метр.

Несомненно, изложенная информация не охватывает полного возможного набора признаков, но вместе с тем создатели данного ГИС-пакета считают, что она отвечает условиям не только необходимости, но и достаточности.

## 2. Построение балльных схем признаков

После проведенной формализации данных и введения баллов возникает сложность, связанная с тем, что каждый признак проанализирован по своей сети опробования, не совпадающей с сетью опробования других признаков. Для решения этой проблемы необходимо создать сплошное поле признака, получившее название «цифровая модель», где каждой точке территории будет присвоено свое значение. Основными параметрами, которые характеризуют создаваемую цифровую модель, являются ее размер и детальность, а так же метод, применяемый для интерполяции значений признаков по всей выбранной площади. Размеры цифровой модели определяются максимальной удаленностью безопасного плавания грунтоотвозных судов.

Детальность построения цифровой модели определяет количество элементарных ячеек на территории, для которых производятся расчеты анализируемого признака. Чем больше таких элементарных ячеек, тем меньше их размер и, соответственно, более детально представляется распределение признака по территории. Для ГИС «Дампинг» оптимальной является ячейка размером 100x100 м. Такая детальность позволяет с высокой точностью изобразить распространение по изучаемой территории всех анализируемых критериев.

Метод интерполяции выбирается на основании того, что ряд признаков имеют достаточно неравномерную сеть опробования, однако значения каждого признака должны быть присвоены каждой элементарной ячейке. Наиболее удобным для решения этой задачи является применение метода интерполяции Крайгинга (Kriging). Этот метод основан на том, что для расчета значения исследуемого признака в интерполируемой точке используется величина  $W$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\ln l_i}}{N},$$

где  $W$  – интерполируемое значение в точке;

$X_i$  – значение признака  $X$  в точке  $i$ ;

$l_i$  – расстояние от точки  $i$  до точки интерполяции;

$N$  – количество точек с известными значениями признака  $X$ .

После введения запрещающих признаков, по которым соответствующие площади исключаются при выборе места дампинга (навигационно-гидрографическая обстановка), формируется базовая информация, подготовленная к суммированию информационных слоев с целью выявления наиболее благоприятных интегральных участков. Проведя такое суммирование, получаем интегральную результирующую схему с нанесением участков различной степени пригодности для отвалов грунтов дноуглубления.

На основании анализа схемы выделяются наиболее благоприятные для дампинга грунтов акватории.

## Приложение Б

Таблица Б.1

### Объемы разработанного и складированного грунта при строительстве и эксплуатации ГСХ Дунай – Черное море на украинском участке дельты за 2004-2011 гг. [127]

Год	Участки дноуглубительных работ	II квартал		III квартал		IV квартал		Итого	
		Объем выемки, м <sup>3</sup>	Объем отвала, м <sup>3</sup>	Объем выемки, м <sup>3</sup>	Объем отвала, м <sup>3</sup>	Объем выемки, м <sup>3</sup>	Объем отвала, м <sup>3</sup>	Объем выемки, м <sup>3</sup>	Объем отвала, м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004	Баровая часть	500000	Морской отвал 500000	573261,2	Морской отвал 573261,2	400000	Морской отвал 400000	1473261,2	Морской отвал 1473261,2
		140000	Подводный депозит в прорези 140000	100000	Подводный депозит в прорези 100000	-	-	240000	Подводный депозит в прорези 240000
		-	-	473261,2	Подводный депозит в прорези 473261,2	-	-	473261,2	Подводный депозит в прорези 473261,2
	11 км	-	-	70693	Морской отвал 70693	-	-	70693	Морской отвал 70693
	30-31 км	-	-	73000	Береговой отвал на о. Ермаков 73000	-	-	73000	Береговой отвал на о. Ермаков 73000
	33-38 км	-	-	129000	Рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 129000	484575	Рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 484575	613575	Рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 613575

Продолж. табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2004	47-49 км 51-52 км	-	-	46975	Береговой отвал на о. Катенька 46975	47550	Береговой отвал на о. Катенька 47550	94525	Береговой отвал на о. Катенька 94525
	61-63 км	-	-	75800	Береговой отвал на 40 км 34847,9 Русловой отвал на 60,5 км 40952,1	274575	Русловой отвал на 60,5км	350375	Береговой отвал на 40 км 34847,9 Русловой отвал на 60,5км 315527
	64-66 км	-	-	31698,3	Русловой отвал на 60,5 км 31698,3	-	-	31698,3	Русловой отвал на 60,5 км 31698,3
	71-74 км	-	-	13462	Русловой отвал 60,5 км 13462	-	-	13462	Русловой отвал на 60,5 км 13462
	Всего разработано грунта	640000	-	1587150,7	-	1206700	-	<b>3433850,7</b>	-
	В том числе на баровой части	640000	-	1146522,4	-	400000	-	<b>2186522,4</b>	-
	Всего уложено в подводный морской отвал	-	500000	-	643954,2	-	400000	-	<b>1543954,2</b>
	Всего уложено в подводный депозит	-	140000	-	573261,2	-	-	-	<b>713261,2</b>
Всего уложено в подводный русловой отвал	-	-	-	86 112,4	-	274575	-	<b>360687,4</b>	
Всего уложено в береговые отвалы	-	-	-	283 822,9	-	532125	-	<b>815947,9</b>	

Продолж. табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	I полугодие			III квартал		IV квартал			
2005	Баровая часть	45550	Морской отвал 45550	97337,5	Морской отвал 97337,5	73000	Морской отвал 73000	215887,5	Морской отвал 215887,5
	33-38 км	321910	Поэтапное реф-ние в береговой отвал на 36-37,5 км 321910	-	-	-	-	321910	Поэтапное рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 321910
	36,6-37 км	16725	Поэтапное реф-ние в береговой отвал на 36-37,5 км 16725	6300	Поэтапное рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 6300	-	-	6300	Поэтапное рефулирование в береговой отвал на 36-37,5 км 6300
	60,5 км	38600	Русловой отвал на 60,5км 38600	94400	Русловой отвал на 60,5 км 94400	-	-	133000	Русловой отвал на 60,5 км 133000
	60-75 км	103600	Русловой отвал на 60,5 км 103600	-	-	-	-	103600	Русловой отвал на 60,5 км 103600
	60-64 км	94400	Русловой отвал на 60,5 км 94400	-	-	-	-	94400	Русловой отвал на 60,5 км 94400
	64-75,5км	-	-	193600	Русловой отвал на 60,5 км 193600	-	-	193600	Русловой отвал на 60,5 км 193600

Продолж. табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2005	Всего разработано грунта	620785	-	391637,5	-	73000	-	<b>1085422,5</b>	-		
	В том числе на баровой части	45550	-	97337,5	-	73000	-	<b>215887,5</b>	-		
	Всего уложено:										
	в подводный морской отвал	-	45550	-	97337,5	-	73000	-	<b>215887,5</b>		
	в подводный русловой отвал	-	236600	-	288000	-	-	-	<b>524600</b>		
	в береговые отвалы	-	338635	-	6300	-	-	-	<b>344935</b>		
2006	Баровая часть	I квартал		III квартал		IV квартал					
		19839,3	-	-	-	159726	-	<b>179565,3</b>	-		
	Всего разработано грунта	19839,3	-	-	-	159726	-	<b>179565,3</b>	-		
	Всего уложено в подводный морской отвал	-	19839,3	-	-	-	159726	-	<b>179565,3</b>		
2007	Баровая часть	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал		<b>1001379,5</b>	<b>1001379,5</b>
			Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		
	257226	257226	352563	352563	121377,5	121377,5	270213	270213			
	Всего разработано грунта	257226		352563		121377,5		270213		<b>1001379,5</b>	
	В том числе на баровой части										
Всего уложено в подводный морской отвал	-	257226	-	352563	-	121377,5	-	270213	-	<b>1001379,5</b>	
2008	Баровая часть	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал		<b>1220241,8</b>	-
			Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		
	246848	246848	287527	287527	381853	381853	304013,8	304013,8			
	Всего разработано грунта	246848		287527		381853		304013,8		<b>1220241,8</b>	
В том числе на баровой части											
Всего уложено в подводный морской отвал	-	246848	-	287527	-	381853	-	304013,8	-	<b>1220241,8</b>	

Продолж. табл. Б.1

1	2	3		4	5	6		7	8	9	10
2009	Баровая часть	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал		-	-
			Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		
		332843,9	332843,9	290463,2	290463,2	189878,2	189878,2	256998,9	256998,9		
	Всего разработано грунта	332843,9	-	290463,2	-	189878,2	-	256998,9	-	<b>1070184,2</b>	-
	В том числе на баровой части	332843,9	-	290463,2	-	189878,2	-	256998,9	-	<b>1070184,2</b>	-
Всего уложено в подводный морской отвал	-	332843,9	-	290463,2	-	189878,2	-	256998,9	-	<b>1070184,2</b>	
2010	Баровая часть	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал		-	-
			Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		Морской отвал		
		226655,3	226655,3	100248,53	518080,97	518080,9	518080,97	297853,7	297853,7		
	Всего разработано грунта	226655,3	-	100248,53	-	518080,9	-	297853,7	-	<b>1142838,5</b>	-
	В том числе на баровой части	226655,3	-	100248,53	-	518080,9	-	297853,7	-	<b>1142838,5</b>	-
Всего уложено в подводный морской отвал	-	226655,3	-	100248,53	-	518080,97	-	297853,7	-	<b>1142838,5</b>	
2011	Всего разработано грунта	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал		-	-
	На баровой части	173409,8		53240,9		-		-		<b>226650,7</b>	-
	На МПК	-		-		314363,1		261368,4		<b>575731,5</b>	-
	Всего уложено в морской отвал	173409,8		53240,9		314363,1		261368,4		-	802382,2



## Приложение В

### Объемы разработанного и складированного грунта ОМТП в 2005-2010 гг. [136, 137]

Год	Время работы	Дноуглубление								Складирование				
		Место								Земснаряд	Всего изъято, м <sup>3</sup>	Место	Зем. снаряд	Всего складировано, м <sup>3</sup>
		Акват. причалов	Нефтегавань	Акват. Заводск. гавани, причал №29 (рем. черпание)	Строящ. причал 29-I	Причалы № 43-53 кап. дноуглубление	Подходной канал		Причал 1-н (рем. черп.)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2005	7.07-30.10	54090	-	-	-	182370	100176		-	З/с «Виктор Лекарев»	306636	Подв. отвал 46°23'38"СШ 31°00'00"ВД	Метод свободно-го сброса	306636
Всего в 2005 году объем изъятого грунта составляет 306 636 м <sup>3</sup>														
2006	01.06-30.08	-	-	-	-	-	20915	37203	438,75	То же	58556	То же	То же	58556
	01.08-30.09	-	-	91038	-	-	-		-	То же	91038	То же	То же	91038
Всего в 2006 году объем изъятого грунта составляет 149 594 м <sup>3</sup>														
2007	01.10-31.12	-	-	-	34050	-	-		-	З/с «Федоренко»	34050	То же	То же	34050
Всего в 2007 году объем изъятого грунта составляет 34 050 м <sup>3</sup>														
2008	01.01-31.03	-	-	-	128071	-	-		-	-	128071	То же	То же	128071
	01.10-30.12	10358	-	-	-	-	-		-	Грейферн. плавкран	10358	То же	То же	10358
Всего в 2008 году объем изъятого грунта составляет 138 429 м <sup>3</sup>														
2009	01.01-01.06	Подчистка акватории прич. №№ 12, 13, 18, 22, 23								То же	2402	То же	То же	2402
		Подчистка акватории прич. №№ 32, 33								То же	3028	-	-	3028
		Подчистка акватории Карантинной гавани у прич. №№ 3-6, 10, 11								То же	2770	-	-	2770
		Подчистка акватории Практической гавани у прич. №№ 25, 26								То же	1401	-	-	1401
		Подчистка акватории прич. 1-н								То же	207	-	-	207

Продолж. табл.

1	2	3-10						11	12	13	14	15
2009	01.01-01.06	Подчистка акватории элеваторного пирса у причала №30						Грейферн. плавкран	550	-	-	550
	01.04-01.06	43219	74730				39007	То же	156950	То же	То же	156956
	IV квартал	Эксплуатационные дноуглубительные работы при подчистке акватории причалов: №№ 16з, 42, 43 и 44 Хлебной гавани						Многочерпачевый земснаряд «Дунай»	90850	То же	То же	90850
		То же №37 Заводской гавани						То же	14034	То же	То же	14034
Всего в 2009 году объем изъятых грунтов составляет 272198 м <sup>3</sup>												
Всего в 2009 году объем складированного грунта составляет 272198 м <sup>3</sup>												
2010	I полугодие	Хлебная гавань Одесского порта						«Майкан»	80131	То же	То же	80131
		Акватория 2-го колена Подходного канала Одесского порта						«Дунай», «Майкан»	361830	То же	То же	-
		Акватория Аванпорта, прилегающая к причалу №2 и Восточного входа в порт						«Багмейстер Федоренко»	7040	То же	То же	7040
	Всего								449001			449001
Всего	III квартал	Хлебная гавань Одесского порта						Многочерпачевый земснаряд	129959	То же	То же	129959
		Акватория Аванпорта, прилегающая к причалу №2 и Восточного входа в порт						То же	115095	То же	То же	115095
								245054			245054	
Всего	IV квартал	Акватория, прилегающая к Восточному входу в Одесский порт						То же	31865	То же	То же	31865
									31865			31865
Всего в 2010 году объем изъятых грунтов составляет 725920 м <sup>3</sup>												
Всего в 2010 году объем складированного грунта составляет 725920 м <sup>3</sup>												
<b>Итого в 2005-2010 гг. объем изъятых грунтов составляет 1626827 м<sup>3</sup></b>												
<b>Итого в 2005-2010 гг. объем складированного грунта составляет 1626827 м<sup>3</sup></b>												

### Приложение Г

#### Объемы разработанного и складированного грунта в 2003-2009 гг. в порту «Южный» [141–144]

Год	Время	Дноуглубление			Складирование		
		Место	Земснаряд	Всего изъято, м <sup>3</sup>	Место	Земснаряд	Всего складировано, м <sup>3</sup>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
2003	17.02-13.04	Локальные участки акватории МТП «Южный»	Морской грейферный самоотвозный земснаряд «Куяльник»	8000	Морской отвал порта «Южный» с координатами центра 46°25'23"СШ 31°01'30" ВД	Морской грейферный самоотвозный земснаряд «Куяльник»	8000
2003	12.08-03.09	Акватория причала ООО «Трансбункер ЮГ»	Многочерпаковый земснаряд «Виктор Лазарев»	48000	То же	Самоходные шаланды	48000
2003	I квартал	Причал №8	З/с «Виктор Лекарев»	256062	То же	То же	256062
2003	II квартал	Причал №8	ОАО «Черномортехфлот»	109884	То же	То же	109884
2004	II квартал	Причал №8	ОАО «Черномортехфлот»	104568	То же	То же	104568
2006 2007	24.11.06 31.01.07	Зерновой причал ООО «Бориваж»	Многочерпаковый земснаряд типа «Скадовск»	164840	То же	То же	164840
2008	01.01-30.03	То же	То же	295800	То же	То же	295800
	II квартал	То же	То же	196260	То же	То же	196260
	01.07-05.09	То же	То же	67840	То же	То же	67840
<b>Всего</b>				<b>1251254</b>			<b>1251254</b>

Продолж. табл.

1	2	3	4	5	6	7	8
2006	20.09-01.12	Котлован строящегося причала №9	Экскаватор «Liebherr 995» с борта шагающего понтона «МР 26»	506995	Морской подводный отвал порта «Южный»	Несамходные самооткрывающиеся баржи МС34, МС35, МС36, МС37	506995
2008	11.04-16.05	Котлован строящегося причала №9. Очистка	Трюмно-рефулерный самоотвозный землесос «Кинбурский»	11000	Морской подводный отвал порта «Южный»	Несамходные самооткрывающиеся баржи МС34, МС35, МС36, МС37	11000
2009	28.05-30.06	Операционная акватория причала №9	Многочерпаковый земснаряд	259443	Морской подводный отвал порта «Южный»	Самоходные самооткрывающиеся грунтоотвозные шаланды	259443
2009	II квартал	Участок операционной акватории строящегося причала №9	Многочерпаковый земснаряд	259443	Морской подводный отвал порта «Южный»	Самоходные самооткрывающиеся грунтоотвозные шаланды	259443
2009	III квартал	Операционная акватория причала №9	Многочерпаковый земснаряд	329200	Морской подводный отвал порта «Южный»	Самоходные самооткрывающиеся грунтоотвозные шаланды	329200
2009	IV квартал	Создание операционной акватории причала №9	Многочерпаковый земснаряд	285988	Морской подводный отвал порта «Южный»	Самоходные самооткрывающиеся грунтоотвозные шаланды	285988
Всего объем изъятго грунта в 2009 г. составляет, м <sup>3</sup>				874631	Всего объем складировуемого грунта составляет, м <sup>3</sup>		874631
<b>Итого в 2006, 2008 и 2009 гг. объем изъятго грунта составляет 1 652 069 м<sup>3</sup></b>							
<b>Итого в 2006, 2008 и 2009 гг. объем складированного грунта составляет 1 652 069 м<sup>3</sup></b>							

Продолж. табл.

1	2	3	4	5	6	7	8
2004 2005	27.12.04- 14.03.05	На подходном канале на внутреннем канале	Земкараваном ОАО «ЧТФ» «Багмейстер Федоренко»	47057  123135	Подводный морской отвал	Грунтоотвозные дизельные шаланды	170192
2007	Лето 2007	На подходном канале на внутреннем канале	Земкараваном ОАО «ЧТФ» «Багмейстер Федоренко»	50908  7060	Методом свободного сброса на первый загрузочный участок морского подводного отвала	Грунтоотвозные дизельные шаланды	57968
Итого в 2004, 2005, 2007 гг. объем изъятых грунта на подходном канале составляет 97965 м <sup>3</sup>							
Итого в 2004, 2005, 2007 гг. объем изъятых грунта на внутреннем канале составляет 130195 м <sup>3</sup>							
<b>Итого в 2004, 2005, 2007 гг. объем складированного грунта составляет 228160 м<sup>3</sup></b>							
В 2005-2008 гг. объем изъятых грунта по причалам №18-20 составляет 6581539 м <sup>3</sup>							
В 2008, 2009 гг. объем изъятых грунта «Тис-Руда» составляет 476964 м <sup>3</sup>							
<b>Итого по причалам №18-20 и «Тис-Руда» объем изъятых грунта составляет 7058503 м<sup>3</sup></b>							
2010	I квартал	Операционная акватория причала №10	Многочерпаковый земснаряд	55000	Морской подводный отвал порта «Южный»	Самоходные самооткрывающиеся грунтоотвозные шаланды	55000
<b>Итого в 2003-2010 гг. объем складированного грунта составляет 10244986 м<sup>3</sup></b>							

## Приложение Д

Таблица Д.1

**Распределение частиц ВВ в разные моменты времени в плоской постановке задачи ( $u = 1,38$  см/с)**

$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{k,n}, \%$										
				$k = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	2,000	0,000	84,000	24,145	6,808	2,203	0,770	0,282	0,107	0,041	0,016	0,006	<b>0,003</b>
2	3	1,333	0,667	84,000	21,096	6,224	2,063	0,731	0,270	0,103	0,040	0,016	0,006	0,003
3	5	1,200	0,800	84,000	15,987	5,199	1,809	0,659	0,248	0,096	0,038	0,015	0,006	0,002
4	7	1,143	0,857	0,000	10,373	3,961	1,485	0,565	0,219	0,086	0,034	0,014	0,006	0,002
5	9	1,111	0,889	0,000	5,671	2,747	1,140	0,459	0,184	0,074	0,030	0,012	0,005	0,002
6	11	1,091	0,909	0,000	2,568	1,729	0,818	0,354	0,149	0,062	0,026	0,011	0,004	0,002
7	13	1,077	0,923	0,000	0,945	0,984	0,548	0,259	0,115	0,050	0,021	0,009	0,004	0,002
8	15	1,067	0,933	0,000	0,276	0,505	0,342	0,180	0,086	0,039	0,017	0,007	0,003	0,001
9	17	1,059	0,941	0,000	0,062	0,233	0,199	0,118	0,061	0,029	0,013	0,006	0,003	0,001
10	19	1,053	0,947	0,000	0,010	0,096	0,108	0,074	0,041	0,021	0,010	0,005	0,002	0,001
11	21	1,048	0,952	0,000	0,001	0,035	0,054	0,043	0,027	0,015	0,007	0,004	0,002	0,001
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,011	0,025	0,024	0,017	0,010	0,005	0,003	0,001	0,001
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,003	0,011	0,013	0,010	0,006	0,004	0,002	0,001	0,000
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,001	0,004	0,006	0,006	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
17	33	1,030	0,970	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
18	35	1,029	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	37	1,027	0,973	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
СУММА				756,000	336,974	150,201	66,950	29,842	13,301	5,929	2,643	1,178	0,525	0,234
Расчет по формуле (3.15)					336,974	150,201	66,950	29,842	13,301	5,929	2,643	1,178	0,525	0,234

Таблица Д.2

**Распределение частиц ВВ в разные моменты времени в плоской постановке задачи ( $u = 0,32$  см/с)**

$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{k,n}, \%$										
				$k = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	2,000	0,000	114,000	63,546	33,937	20,643	13,525	9,283	6,576	4,766	3,514	2,626	<b>1,984</b>
2	3	1,333	0,667	114,000	55,321	30,893	19,263	12,808	8,875	6,330	4,610	3,412	2,558	1,937
3	5	1,200	0,800	114,000	41,536	25,576	16,769	11,484	8,112	5,864	4,314	3,218	2,427	1,847
4	7	1,143	0,857	0,000	26,479	19,220	13,613	9,747	7,088	5,229	3,905	2,946	2,242	1,719
5	9	1,111	0,889	0,000	14,073	13,078	10,297	7,830	5,920	4,488	3,419	2,620	2,019	1,563
6	11	1,091	0,909	0,000	6,120	8,032	7,251	5,951	4,725	3,706	2,896	2,262	1,770	1,388
7	13	1,077	0,923	0,000	2,137	4,437	4,749	4,278	3,604	2,945	2,372	1,896	1,511	1,203
8	15	1,067	0,933	0,000	0,586	2,196	2,889	2,906	2,625	2,252	1,879	1,544	1,257	1,018
9	17	1,059	0,941	0,000	0,123	0,970	1,630	1,865	1,826	1,656	1,439	1,220	1,018	0,841
10	19	1,053	0,947	0,000	0,019	0,381	0,852	1,130	1,213	1,171	1,066	0,936	0,803	0,678
11	21	1,048	0,952	0,000	0,002	0,132	0,412	0,646	0,769	0,797	0,763	0,697	0,617	0,534
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,040	0,184	0,348	0,465	0,521	0,528	0,504	0,461	0,411
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,011	0,076	0,177	0,268	0,327	0,353	0,353	0,336	0,308
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,002	0,029	0,085	0,147	0,198	0,228	0,241	0,238	0,226
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,000	0,010	0,038	0,077	0,115	0,143	0,159	0,164	0,161
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,003	0,016	0,038	0,064	0,086	0,102	0,110	0,113
17	33	1,030	0,970	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006	0,018	0,034	0,050	0,063	0,072	0,077
18	35	1,029	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,008	0,018	0,028	0,038	0,046	0,051
19	37	1,027	0,973	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,009	0,015	0,022	0,028	0,033
20	39	1,026	0,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,008	0,013	0,017	0,021
21	41	1,024	0,976	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,007	0,010	0,013
22	43	1,023	0,977	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,006	0,008
23	45	1,022	0,978	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,005
СУММА				1026,000	855,583	713,472	594,966	496,143	413,735	345,014	287,708	239,920	200,070	166,838
Расчет по формуле (3.15)					855,583	713,472	594,966	496,143	413,735	345,014	287,708	239,920	200,070	166,838

Таблица Д.3

**Распределение частиц ВВ в разные моменты времени в плоской постановке задачи ( $u = 0,05$  см/с)**

$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{k,n}, \%$										
				$k = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	2,000	0,000	114,000	74,724	46,672	33,137	25,328	20,275	16,749	14,154	12,168	10,603	<b>9,339</b>
2	3	1,333	0,667	114,000	64,998	42,440	30,894	23,966	19,372	16,113	13,685	11,811	10,324	9,116
3	5	1,200	0,800	114,000	48,694	35,057	26,846	21,456	17,685	14,912	12,794	11,129	9,787	8,686
4	7	1,143	0,857	0,000	30,906	26,256	21,733	18,171	15,423	13,275	11,565	10,178	9,034	8,078
5	9	1,111	0,889	0,000	16,309	17,780	16,378	14,554	12,848	11,368	10,106	9,034	8,119	7,334
6	11	1,091	0,909	0,000	7,021	10,853	11,480	11,019	10,222	9,362	8,538	7,784	7,105	6,498
7	13	1,077	0,923	0,000	2,419	5,949	7,476	7,884	7,766	7,415	6,974	6,508	6,052	5,620
8	15	1,067	0,933	0,000	0,653	2,918	4,518	5,328	5,632	5,647	5,505	5,282	5,020	4,744
9	17	1,059	0,941	0,000	0,135	1,275	2,530	3,399	3,898	4,135	4,201	4,159	4,053	3,909
10	19	1,053	0,947	0,000	0,020	0,494	1,311	2,045	2,574	2,910	3,098	3,179	3,186	3,143
11	21	1,048	0,952	0,000	0,002	0,169	0,628	1,160	1,621	1,969	2,207	2,357	2,437	2,467
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,051	0,277	0,620	0,973	1,279	1,520	1,695	1,815	1,889
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,013	0,113	0,312	0,557	0,799	1,011	1,183	1,316	1,412
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,003	0,042	0,148	0,304	0,479	0,649	0,801	0,928	1,030
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,001	0,014	0,066	0,158	0,276	0,403	0,526	0,637	0,733
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,005	0,027	0,078	0,152	0,241	0,335	0,426	0,509
17	33	1,030	0,970	0,000	0,000	0,000	0,001	0,011	0,037	0,081	0,140	0,207	0,277	0,345
18	35	1,029	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,016	0,041	0,078	0,124	0,175	0,228
19	37	1,027	0,973	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,020	0,042	0,072	0,108	0,147
20	39	1,026	0,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,009	0,022	0,040	0,064	0,092
21	41	1,024	0,976	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,011	0,022	0,037	0,057
22	43	1,023	0,977	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,005	0,012	0,021	0,034
23	45	1,022	0,978	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,006	0,012	0,020
СУММА				1026,00	997,506	969,804	942,871	916,686	891,228	866,477	842,413	819,018	796,272	774,159
Расчет по формуле (3.15)					997,506	969,804	942,871	916,686	891,228	866,477	842,413	819,018	796,272	774,159

Таблица Д.4

**Распределение частиц ВВ в разные моменты времени в плоской постановке задачи ( $u = 0,003$  см/с)**

$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{k,n}, \%$										
				$k = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	2,000	0,000	120,00	80,885	51,904	37,848	29,709	24,422	20,716	17,977	15,870	14,199	<b>12,843</b>
2	3	1,333	0,667	120,00	70,348	47,189	35,281	28,108	23,331	19,927	17,380	15,403	13,825	12,535
3	5	1,200	0,800	120,00	52,681	38,965	30,648	25,157	21,294	18,438	16,246	14,511	13,105	11,942
4	7	1,143	0,857	0,000	33,411	29,165	24,799	21,297	18,565	16,410	14,681	13,268	12,094	11,105
5	9	1,111	0,889	0,000	17,609	19,735	18,677	17,048	15,459	14,047	12,825	11,774	10,866	10,079
6	11	1,091	0,909	0,000	7,567	12,033	13,081	12,900	12,292	11,563	10,831	10,140	9,505	8,928
7	13	1,077	0,923	0,000	2,602	6,587	8,510	9,222	9,332	9,153	8,841	8,475	8,094	7,719
8	15	1,067	0,933	0,000	0,701	3,226	5,137	6,226	6,763	6,967	6,976	6,874	6,710	6,513
9	17	1,059	0,941	0,000	0,144	1,407	2,873	3,968	4,677	5,097	5,319	5,410	5,415	5,364
10	19	1,053	0,947	0,000	0,022	0,544	1,486	2,385	3,085	3,584	3,920	4,131	4,253	4,311
11	21	1,048	0,952	0,000	0,002	0,186	0,710	1,351	1,941	2,422	2,791	3,061	3,252	3,381
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,056	0,313	0,721	1,164	1,573	1,920	2,200	2,420	2,587
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,015	0,127	0,362	0,665	0,981	1,275	1,534	1,753	1,932
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,003	0,047	0,171	0,362	0,587	0,818	1,038	1,235	1,408
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,001	0,016	0,076	0,188	0,338	0,507	0,681	0,847	1,001
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,005	0,032	0,092	0,186	0,303	0,433	0,565	0,694
17	33	1,030	0,970	0,000	0,000	0,000	0,001	0,012	0,043	0,099	0,175	0,267	0,367	0,470
18	35	1,029	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,019	0,050	0,098	0,160	0,232	0,310
19	37	1,027	0,973	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,008	0,024	0,053	0,093	0,142	0,200
20	39	1,026	0,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,011	0,027	0,052	0,085	0,125
21	41	1,024	0,976	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,014	0,028	0,049	0,077
22	43	1,023	0,977	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,007	0,015	0,028	0,046
23	45	1,022	0,978	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,008	0,015	0,027
СУММА				1080,00	1078,18	1076,36	1074,55	1072,73	1070,93	1069,12	1067,32	1065,52	1063,72	1061,93
Расчет по формуле (3.15)					1078,18	1076,36	1074,55	1072,73	1070,93	1069,12	1067,32	1065,52	1063,72	1061,93

Таблица Д.5

**Распределение частиц ВВ в разные моменты времени в плоской постановке задачи ( $u = 0,0003$  см/с)**

$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{k,n}, \%$										
				$k = 0$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	2,000	0,000	114,000	76,964	49,464	36,125	28,399	23,381	19,863	17,263	15,263	13,677	<b>12,389</b>
2	3	1,333	0,667	114,000	66,937	44,971	33,674	26,868	22,337	19,107	16,690	14,814	13,316	12,093
3	5	1,200	0,800	114,000	50,126	37,133	29,252	24,048	20,386	17,679	15,600	13,956	12,622	11,520
4	7	1,143	0,857	0,000	31,789	27,793	23,668	20,358	17,773	15,734	14,097	12,760	11,649	10,712
5	9	1,111	0,889	0,000	16,753	18,805	17,825	16,296	14,799	13,468	12,315	11,323	10,466	9,722
6	11	1,091	0,909	0,000	7,199	11,465	12,484	12,330	11,767	11,086	10,400	9,751	9,155	8,612
7	13	1,077	0,923	0,000	2,475	6,276	8,121	8,814	8,933	8,776	8,489	8,150	7,796	7,446
8	15	1,067	0,933	0,000	0,666	3,073	4,902	5,951	6,474	6,679	6,698	6,610	6,462	6,283
9	17	1,059	0,941	0,000	0,137	1,340	2,741	3,792	4,476	4,886	5,107	5,202	5,215	5,174
10	19	1,053	0,947	0,000	0,021	0,518	1,418	2,279	2,953	3,436	3,763	3,973	4,096	4,158
11	21	1,048	0,952	0,000	0,002	0,177	0,678	1,291	1,857	2,322	2,679	2,943	3,132	3,261
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,053	0,299	0,689	1,114	1,507	1,843	2,116	2,330	2,495
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,014	0,121	0,346	0,636	0,940	1,224	1,475	1,688	1,864
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,003	0,045	0,163	0,346	0,563	0,786	0,998	1,189	1,358
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,001	0,015	0,072	0,179	0,324	0,487	0,654	0,816	0,965
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,005	0,030	0,088	0,179	0,291	0,416	0,544	0,670
17	33	1,030	0,970	0,000	0,000	0,000	0,001	0,012	0,041	0,095	0,168	0,257	0,353	0,453
18	35	1,029	0,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,018	0,048	0,094	0,153	0,223	0,299
19	37	1,027	0,973	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,008	0,023	0,050	0,089	0,137	0,193
20	39	1,026	0,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,011	0,026	0,050	0,082	0,121
21	41	1,024	0,976	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,013	0,027	0,048	0,074
22	43	1,023	0,977	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,006	0,014	0,027	0,044
23	45	1,022	0,978	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,007	0,015	0,026
СУММА				1026,000	1025,827	1025,654	1025,481	1025,308	1025,135	1024,962	1024,789	1024,616	1024,443	1024,270
Расчет по формуле (3.15)					1025,827	1025,654	1025,481	1025,308	1025,135	1024,962	1024,789	1024,616	1024,443	1024,270

Таблица Д.6

**Распределение частиц ВВ в начальный момент времени в пространственной постановке задачи**  
**( $k = 0, u = 1,38$  см/с)**

0	Средняя концентрация ВВ по глубине			84,0			Количество ВВ в облаке, % от исходного												100	
$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{0,n,m}$ , мг/дм <sup>3</sup>																
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1	2,0000	0,0000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	
2	3	1,3333	0,6667	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	
3	5	1,2000	0,8000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	84,000	
4	7	1,1429	0,8571	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
5	9	1,1111	0,8889	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
6	11	1,0909	0,9091	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Левая часть равенства (3.66)				12096,000																
Правая часть равенства (3.66)				12096,000																

Таблица Д.7

Распределение частиц ВВ на расстоянии 200 м до КР в пространственной постановке задачи ( $k = 23$ ,  $u = 1,38$  см/с)

23	Средняя концентрация ВВ по глубине			0,00			Количество ВВ в облаке, % от исходного													0,039		
$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{23,n,m}$ , мг/дм <sup>3</sup>																		
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
1	1	2,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,009	0,020	0,039		
2	3	1,333	0,667	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,008	0,018	0,036		
3	5	1,200	0,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,007	0,016	0,031			
4	7	1,143	0,857	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,006	0,013	0,025			
5	9	1,111	0,889	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,009	0,019			
6	11	1,091	0,909	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,007	0,013			
7	13	1,077	0,923	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,008			
8	15	1,067	0,933	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,005			
9	17	1,059	0,941	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003			
10	19	1,053	0,947	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001			
11	21	1,048	0,952	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001			
12	23	1,043	0,957	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
13	25	1,040	0,960	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
14	27	1,037	0,963	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
15	29	1,034	0,966	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
16	31	1,032	0,968	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
Левая часть равенства (3.66)				2,01552																		
Правая часть равенства (3.66)				2,01552																		

Таблица Д.8

**Распределение частиц ВВ в начальный момент времени в пространственной постановке задачи**  
**( $k = 0, u = 0,32$  см/с)**

0	Средняя концентрация ВВ по глубине			84,0	Количество ВВ в облаке, % от исходного								100
$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{0,n,m}$ , мг/дм <sup>3</sup>									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,0000	0,0000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000
2	3	1,3333	0,6667	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000
3	5	1,2000	0,8000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000
4	7	1,1429	0,8571	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	9	1,1111	0,8889	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	11	1,0909	0,9091	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Левая часть равенства (3.66)				10260,000									
Правая часть равенства (3.66)				10260,000									

Таблица Д.9

**Распределение частиц ВВ на КР в пространственной постановке задачи ( $k = 100, u = 0,32$  см/с)**

100	Средняя концентрация ВВ по глубине			0,34	Количество ВВ в облаке, % от исходного								2,98
$n$	$2n-1$	$b_n$	$d_n$	$C_{100,n,m}$ , мг/дм <sup>3</sup>									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,000	0,000	0,03719	0,06576	0,10746	0,16570	0,24355	0,34272	0,46197	0,59436	0,72325	<b>0,81618</b>
2	3	1,333	0,667	0,03634	0,06425	0,10499	0,16189	0,23795	0,33484	0,45134	0,58069	0,70661	0,79740
3	5	1,200	0,800	0,03469	0,06133	0,10022	0,15454	0,22713	0,31962	0,43082	0,55427	0,67446	0,76112
4	7	1,143	0,857	0,03235	0,05720	0,09347	0,14412	0,21182	0,29807	0,40176	0,51688	0,62895	0,70976
5	9	1,111	0,889	0,02948	0,05212	0,08517	0,13132	0,19299	0,27157	0,36603	0,47091	0,57301	0,64661
6	11	1,091	0,909	0,02624	0,04640	0,07581	0,11689	0,17179	0,24173	0,32580	0,41914	0,51000	0,57551
7	13	1,077	0,923	0,02282	0,04035	0,06593	0,10166	0,14939	0,21020	0,28330	0,36445	0,44345	0,50040
8	15	1,067	0,933	0,01939	0,03428	0,05602	0,08636	0,12692	0,17857	0,24066	0,30958	0,37668	0,42504
9	17	1,059	0,941	0,01609	0,02846	0,04649	0,07168	0,10533	0,14819	0,19971	0,25689	0,31256	0,35268
10	19	1,053	0,947	0,01305	0,02307	0,03770	0,05811	0,08539	0,12013	0,16189	0,20824	0,25335	0,28586
11	21	1,048	0,952	0,01034	0,01827	0,02986	0,04602	0,06762	0,09513	0,12819	0,16488	0,20059	0,22633
12	23	1,043	0,957	0,00800	0,01414	0,02310	0,03560	0,05231	0,07358	0,09915	0,12751	0,15512	0,17503
13	25	1,040	0,960	0,00604	0,01068	0,01745	0,02690	0,03952	0,05559	0,07490	0,09632	0,11717	0,13220
14	27	1,037	0,963	0,00446	0,00789	0,01288	0,01985	0,02917	0,04102	0,05526	0,07106	0,08644	0,09752
15	29	1,034	0,966	0,00322	0,00568	0,00928	0,01431	0,02102	0,02956	0,03982	0,05120	0,06228	0,07026
16	31	1,032	0,968	0,00226	0,00400	0,00654	0,01007	0,01479	0,02080	0,02802	0,03603	0,04382	0,04943
17	33	1,030	0,970	0,00156	0,00275	0,00449	0,00692	0,01017	0,01430	0,01925	0,02475	0,03010	0,03396
18	35	1,029	0,971	0,00104	0,00185	0,00302	0,00465	0,00682	0,00959	0,01292	0,01661	0,02019	0,02278
19	37	1,027	0,973	0,00068	0,00121	0,00198	0,00304	0,00447	0,00628	0,00846	0,01088	0,01323	0,01492
20	39	1,026	0,974	0,00044	0,00077	0,00126	0,00195	0,00286	0,00402	0,00541	0,00696	0,00846	0,00954
21	41	1,024	0,976	0,00027	0,00048	0,00079	0,00122	0,00179	0,00251	0,00338	0,00434	0,00528	0,00595
22	43	1,023	0,977	0,00017	0,00030	0,00048	0,00074	0,00109	0,00153	0,00206	0,00265	0,00322	0,00363
23	45	1,022	0,978	0,00010	0,00018	0,00029	0,00044	0,00065	0,00091	0,00122	0,00157	0,00191	0,00216
Левая часть равенства (3.66)				306,18532									
Правая часть равенства (3.66)				306,18532									

## Приложение Е

## а) Точка сброса I.

Таблица Е.1

## Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта в точке I

Момент времени	Расстояние, м	Максимальная концентрация фракции ВВ (мг/дм <sup>3</sup> ) с различной гидравлической крупностью $u$ (см/с)					Σ
		$u = 1,38$	$u = 0,32$	$u = 0,05$	$u = 0,003$	$u = 0,0003$	
0	0	84,0000	114,0000	114,0000	120,0000	114,0000	546,0000
5	45	74,4742	101,5710	101,5710	106,9169	101,5710	486,1041
10	90	47,9518	76,9759	76,9779	81,0294	76,9779	359,9129
15	135	7,5619	60,1609	60,4474	63,6352	60,4537	252,2592
20	180	0,3440	47,9601	49,4429	52,0845	49,4817	199,3131
25	225	0,0083	38,2210	41,6877	43,9905	41,7950	165,7025
30	270	0,0001	30,2153	35,9342	38,0365	36,1426	140,3288
35	315	0,0000	23,6822	31,4893	33,4834	31,8222	120,4771
40	360	0,0000	18,4319	27,9458	29,8927	28,4167	104,6871
45	405	0,0000	14,2733	25,0502	26,9902	25,6654	91,9791
50	450	0,0000	11,0159	22,6373	24,5960	23,3972	81,6465
55	495	0,0000	8,4847	20,5943	22,5878	21,4957	73,1625
60	540	0,0000	6,5283	18,8416	20,8793	19,8789	66,1282
65	585	0,0000	5,0215	17,3216	19,4083	18,4875	60,2388
70	630	0,0000	3,8633	15,9909	18,1285	17,2775	55,2601
75	675	0,0000	2,9739	14,8168	17,0049	16,2157	51,0112
80	720	0,0000	2,2912	13,7735	16,0106	15,2764	47,3517
85	765	0,0000	1,7670	12,8408	15,1245	14,4398	44,1721
90	810	0,0000	1,3643	12,0026	14,3299	13,6898	41,3865
95	855	0,0000	1,0546	11,2456	13,6134	13,0136	38,9271
100	900	0,0000	0,8162	10,5590	12,9639	12,4009	36,7400

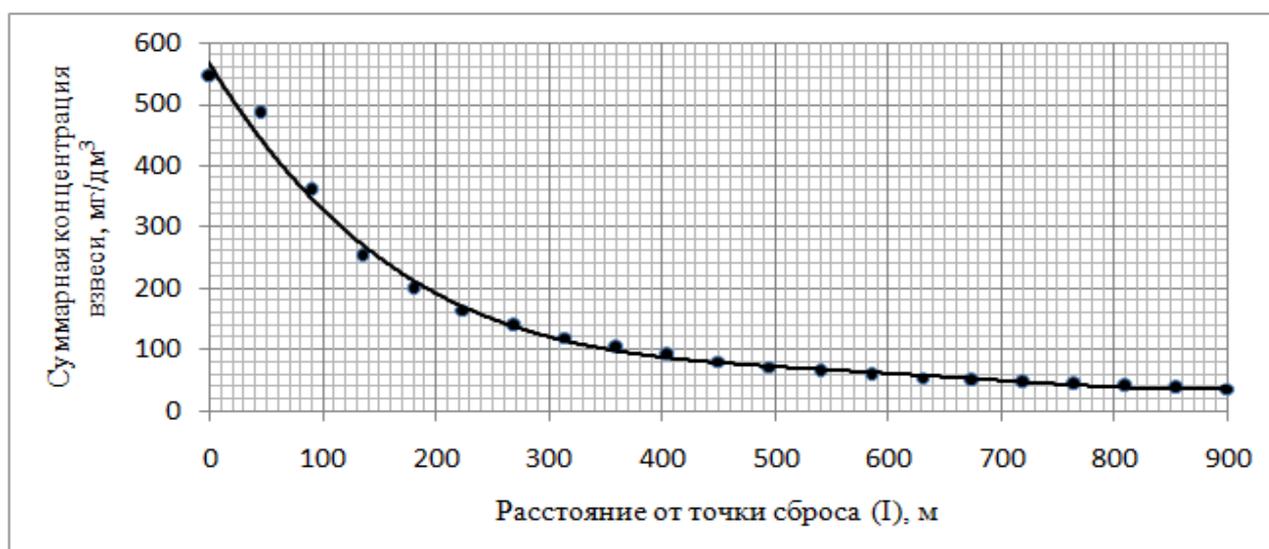


Рис. Е.1. Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта в точке I.

Таблица Е.2

## Расчет количества ВВ на КР (точка I)

№ п/п	Фракция ВВ, мм	и, см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса (М) фракции ВВ на КР	
				М, % от массы фракции в ТС	М, % от общей массы ВВ в ТС
1	1 – 0,5	9,59	4,0	–	–
2	0,50 – 0,25	4,42	5,0	–	–
3	0,25 – 0,10	1,38	14,0	–	–
4	0,10 – 0,05	0,32	19,0	2,98	0,566
5	0,05 – 0,01	0,05	19,0	73,16	13,90
6	0,01 – 0,005	0,003	20,0	98,32	19,66
7	< 0,005	0,0003	19,0	99,83	18,97
Σ			100,0	–	<b>53,10</b>

Таблица Е.3

## Концентрация ЗВ в водной среде на КР (точка I)

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС грунта, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	0,10	0,00006	0,00001	0,01	в норме
2	Ртуть	0,06	0,00004	0,00000	0,0001	в норме
3	Свинец	3,25	0,00195	0,00021	0,01	в норме
4	Цинк	97,1	0,05826	0,00634	0,05	в норме
5	Медь	32,7	0,01962	0,00214	0,005	в норме
6	Железо	14050	8,432	0,9180	0,05	не соответств. норме
7	Марганец	372	0,2232	0,02430	0,05	в норме
8	Хром	48,1	0,02886	0,00314	0,02	в норме
9	НП	295	0,1770	0,01927	0,05	в норме
10	ВВ	–	600,0	36,7	0,75	не соответств. норме

Характеристики зоны повышенной мутности на КР (точка I):

- максимальная концентрация ВВ – 36,7 мг/дм<sup>3</sup>;
- общее количество ВВ в % от исходного – 53,1;
- радиус зоны загрязнения по ВВ – 32,0÷35,8 м;
- площадь зоны загрязнения по ВВ – 3220÷4020 м<sup>2</sup>;
- кратность разбавления растворенных веществ – 9,19.

Концентрации ЗВ в морской среде на КР не превышают ПДК, за исключением железа и ВВ. Радиус зоны загрязнения по железу – 30,0 м.

## б) Точка сброса II.

Таблица Е.4

### Изменение концентрации ВВ после сброса грунта в точке II

Момент времени	Расстояние, м	Максимальная концентрация фракции ВВ (мг/дм <sup>3</sup> ) с различной гидравлической крупностью $u$ (см/с)					$\Sigma$
		$u = 1,38$	$u = 0,32$	$u = 0,05$	$u = 0,003$	$u = 0,0003$	
0	0	84,0000	114,0000	114,0000	120,0000	114,0000	546,0000
5	45	69,7370	94,6430	94,6430	99,6242	94,6430	453,2903
10	90	49,6312	67,3612	67,3613	70,9066	67,3613	322,6216
15	135	37,2506	51,4872	51,4954	54,2062	51,4959	245,9353
20	180	26,8360	41,4719	41,5356	43,7253	41,5392	195,1080
25	225	17,4936	34,5546	34,7562	36,5977	34,7684	158,1704
30	270	10,3322	29,4276	29,8531	31,4515	29,8801	130,9444
35	315	5,6551	25,4270	26,1422	27,5663	26,1901	110,9807
40	360	2,9280	22,1896	23,2343	24,5311	23,3079	96,1909
45	405	1,4571	19,5025	20,8924	22,0953	20,9952	84,9425
50	450	0,7047	17,2324	18,9645	20,0976	19,0990	76,0982
55	495	0,3339	15,2900	17,3487	18,4298	17,5161	68,9186
60	540	0,1559	13,6127	15,9741	17,0165	16,1751	62,9342
65	585	0,0720	12,1540	14,7900	15,8036	15,0244	57,8440
70	630	0,0330	10,8785	13,7589	14,7513	14,0264	53,4481
75	675	0,0150	9,7582	12,8529	13,8297	13,1525	49,6083
80	720	0,0068	8,7706	12,0502	13,0159	12,3809	46,2244
85	765	0,0031	7,8972	11,3341	12,2921	11,6948	43,2212
90	810	0,0014	7,1226	10,6911	11,6440	11,0806	40,5398
95	855	0,0006	6,4340	10,1108	11,0605	10,5276	38,1335
100	900	0,0003	5,8204	9,5842	10,5322	10,0272	<b>35,9642</b>

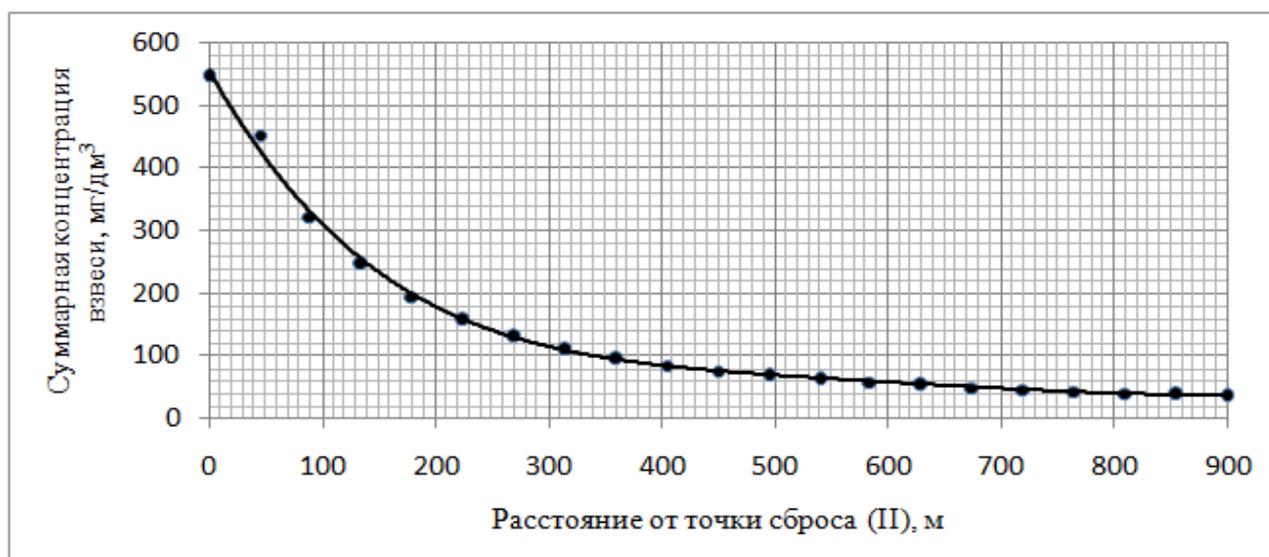


Рис. Е.2. Изменение концентрации ВВ при сбросе грунта в точке II.

Таблица Е.5

## Расчет количества ВВ на КР (точка II)

№ п/п	Фракция ВВ, мм	и, см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса (М) фракции ВВ на КР	
				М, % от массы фракции в ТС	М, % от общей массы ВВ в ТС
1	1 – 0,5	9,59	4,0	–	–
2	0,50 – 0,25	4,42	5,0	–	–
3	0,25 – 0,10	1,38	14,0	0,0010	0,0001
4	0,10 – 0,05	0,32	19,0	37,65	7,154
5	0,05 – 0,01	0,05	19,0	88,89	16,89
6	0,01 – 0,005	0,003	20,0	99,33	19,87
7	< 0,005	0,0003	19,0	99,93	18,99
Σ			100,0	–	<b>62,90</b>

Таблица Е.6

## Концентрация ЗВ в водной среде на КР (точка II)

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС грунта, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	0,10	0,00006	0,00001	0,01	в норме
2	Ртуть	0,06	0,00004	0,00000	0,0001	в норме
3	Свинец	3,25	0,00195	0,00017	0,01	в норме
4	Цинк	97,1	0,05826	0,00513	0,05	в норме
5	Медь	32,7	0,01962	0,00173	0,005	в норме
6	Железо	14050	8,432	0,7419	0,05	не соответств. норме
7	Марганец	372	0,2232	0,01964	0,05	в норме
8	Хром	48,1	0,02886	0,00254	0,02	в норме
9	НП	295	0,1770	0,01557	0,05	в норме
10	ВВ	–	600,0	35,96	0,75	не соответств. норме

Характеристики зоны повышенной мутности на КР (точка II):

- максимальная концентрация ВВ – 36,0 мг/дм<sup>3</sup>;
- общее количество ВВ в % от исходного – 62,9;
- радиус зоны загрязнения по ВВ – 35,7÷39,5 м;
- площадь зоны загрязнения по ВВ – 4000÷4900 м<sup>2</sup>;
- кратность разбавления растворенных веществ – 11,4.

Концентрации ЗВ в морской среде на КР не превышают ПДК, за исключением железа и ВВ. Радиус зоны загрязнения по железу – 32,0 м.

## в) Точка сброса III.

Таблица Е.7

## Изменение концентрации ВВ после сброса грунта в точке III

Момент времени	Расстояние, м	Максимальная концентрация фракции ВВ ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ ) с различной гидравлической крупностью $u$ (см/с)					$\Sigma$
		$u = 1,38$	$u = 0,32$	$u = 0,05$	$u = 0,003$	$u = 0,0003$	
0	0	84,0000	114,0000	114,0000	120,0000	114,0000	546,0000
5	45	63,2685	85,8644	85,8644	90,3835	85,8644	411,2451
10	90	42,6611	57,8994	57,8994	60,9467	57,8994	277,3060
15	135	31,4770	43,3085	43,3110	45,5906	43,3111	206,9982
20	180	22,3258	34,5054	34,5311	36,3496	34,5322	162,2441
25	225	13,8125	28,5944	28,6904	30,2045	28,6944	129,9962
30	270	7,1503	24,2968	24,5280	25,8294	24,5384	106,3429
35	315	3,2085	20,9829	21,4106	22,5580	21,4310	89,5910
40	360	1,2683	18,3136	18,9867	20,0201	19,0206	77,6093
45	405	0,4562	16,0975	17,0461	17,9943	17,0968	68,6909
50	450	0,1517	14,2180	15,4559	16,3398	15,5258	61,6913
55	495	0,0474	12,6014	14,1279	14,9632	14,2190	55,9589
60	540	0,0141	11,1970	13,0012	13,7999	13,1149	51,1270
65	585	0,0040	9,9688	12,0325	12,8038	12,1697	46,9789
70	630	0,0011	8,8897	11,1904	11,9414	11,3514	43,3740
75	675	0,0003	7,9382	10,4511	11,1873	10,6362	40,2131
80	720	0,0001	7,0971	9,7967	10,5225	10,0057	37,4220
85	765	0,0000	6,3521	9,2131	9,9318	9,4457	34,9427
90	810	0,0000	5,6911	8,6893	9,4036	8,9450	32,7290
95	855	0,0000	5,1038	8,2165	8,9284	8,4947	30,7433
100	900	0,0000	4,5812	7,7875	8,4986	8,0875	<b>28,9548</b>

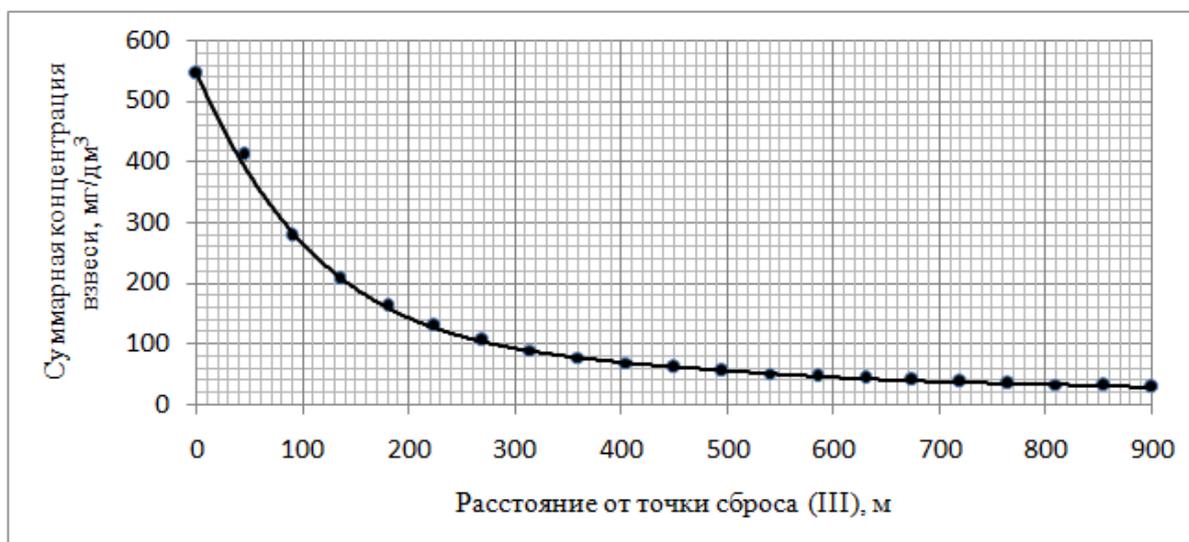


Рис. Е.3. Изменение суммарной концентрации ВВ при сбросе в точке III.

Таблица Е.8

## Расчет количества ВВ на КР (точка III)

№ п/п	Фракция ВВ, мм	и, см/с	Содержание фракции ВВ в ТС, % от суммарного	Масса (М) фракции ВВ на КР	
				М, % от массы фракции в ТС	М, % от общей массы ВВ в ТС
1	1 – 0,5	9,59	4,0	–	–
2	0,50 – 0,25	4,42	5,0	–	–
3	0,25 – 0,10	1,38	14,0	–	–
4	0,10 – 0,05	0,32	19,0	33,18	6,304
5	0,05 – 0,01	0,05	19,0	88,11	16,74
6	0,01 – 0,005	0,003	20,0	99,28	19,86
7	< 0,005	0,0003	19,0	99,93	18,99
Σ			100,0	–	<b>61,89</b>

Таблица Е.9

## Концентрация ЗВ в водной среде на КР (точка III)

№ п/п	Показатель	Содержание в грунте, мг/кг	Концентрация в ТС грунта, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация на КР, мг/дм <sup>3</sup>	Рыбохозяйственная ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Примечание
1	Кадмий	0,10	0,00006	0,00000	0,01	в норме
2	Ртуть	0,06	0,00004	0,00000	0,0001	в норме
3	Свинец	3,25	0,00195	0,00014	0,01	в норме
4	Цинк	97,1	0,05826	0,00413	0,05	в норме
5	Медь	32,7	0,01962	0,00139	0,005	в норме
6	Железо	14050	8,432	0,5983	0,05	не соответств. норме
7	Марганец	372	0,2232	0,01584	0,05	в норме
8	Хром	48,1	0,02886	0,00205	0,02	в норме
9	НП	295	0,1770	0,01256	0,05	в норме
10	ВВ	–	600,0	28,95	0,75	не соответств. норме

Характеристики зоны повышенной мутности на КР (точка III):

- максимальная концентрация ВВ – 29,0 мг/дм<sup>3</sup>;
- общее количество ВВ в % от исходного – 61,9;
- радиус зоны загрязнения по ВВ – 37,6÷41,4 м;
- площадь зоны загрязнения по ВВ – 4440÷5380 м<sup>2</sup>;
- кратность разбавления растворенных веществ – 14,1.

Концентрации ЗВ в морской среде на КР не превышают ПДК, за исключением железа и ВВ. Радиус зоны загрязнения по железу – 33,8 м.