

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН»

На правах рукописи

ГУРОВ КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ

**ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИНАМИКА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО
СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ КРЫМА**

Специальность 1.6.17 – океанология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
член-корреспондент РАН,
доктор географических наук
Коновалов Сергей Карпович

Севастополь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ДОННЫЕ НАНОСЫ И ФАКТОРЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ КРЫМА.....	22
1.1 Классификация прибрежных морских наносов	22
1.2 Факторы формирования и динамики донных наносов в прибрежных районах Крыма	24
1.3. Особенности гранулометрического состава донных наносов в прибрежных районах Крыма	30
Выводы к главе 1	35
ГЛАВА 2 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	37
2.1. Каламитский залив.....	37
2.1.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны..	37
2.1.2 Гидрометеорологические условия района.....	41
2.2 Лименский залив	44
2.2.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны.	44
2.2.2 Гидрометеорологические условия района.....	46
2.3 Балаклавская бухта.....	48
2.3.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны.	48
2.3.2 Гидрометеорологические условия района.....	50
Выводы к главе 2	54
ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ И ЕГО ДИНАМИКИ.....	56
3.1 Материал исследований.....	56
3.2 Методы исследований	60
3.2.1 Гранулометрический анализ ситовым методом.....	60

3.2.2 Комплексная модель морфодинамики береговой зоны <i>XBeach</i>	66
Выводы к главе 3	76
ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ КРЫМА.....	78
4.1 Каламитский залив.....	78
4.1.1 Наносы мористой и прибрежной зон.	78
4.1.2 Наносы береговой зоны.....	83
4.2 Лименский залив	92
4.3 Балаклавская бухта.....	95
Выводы к главе 4	99
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ....	102
5.1 Каламитский залив.....	102
5.1.1 Начальные и граничные условия.....	102
5.1.2 Район пгт Николаевка.....	103
5.1.3 Район пересыпи оз. Сасык.....	110
5.1.4 Район пересыпи оз. Богайлы.....	116
5.2 Лименский залив	122
5.3 Балаклавская бухта.....	130
Выводы к главе 5	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Прибрежные районы являются зонами активной антропогенной нагрузки, а также интенсивных гидро- и геодинамических процессов. Это определяет высокую скорость изменений характеристик прибрежных экосистем в результате одновременного влияния естественных и антропогенных факторов [Гуров и Фомин, 2021а]. Донные наносы прибрежных районов Крыма отличаются большим разнообразием и, благодаря смешению источников поступления материала, постоянной неоднородностью их пространственного распределения.

С началом XXI в. на берегах Крыма развернулось бурное строительство, которое породило целый комплекс социальных и экологических проблем [Горячкин и Долотов, 2019]. Воздействие антропогенного фактора нарушает естественный ход природных процессов, осложняет экологическую обстановку. Характерными примерами негативного антропогенного воздействия являются исчезновение и деградация пляжей, изменение морфологии береговой зоны и структуры прибрежных наносов, а также их загрязнение.

Гранулометрический состав – одна из основных характеристик донных наносов, определяющая различный отклик компонентов наносов на гидродинамическое воздействие, их взмучивание, перемещение и переотложение, что дает возможность прогнозировать влияние на экосистему различных метеорологических и океанологических характеристик. Несмотря на большой интерес к изучению прибрежных районов Крыма, детальных исследований особенностей гранулометрического состава донных наносов и его динамики для акваторий Каламитского и Лименского заливов, а также Балаклавской бухты не проводилось.

Для акватории Каламитского залива имеющиеся сведения представлены фрагментарно, как по времени, так и по пространству. На данный момент основные сведения о гранулометрическом составе донных наносов Каламитского залива датированы концом XIX в. [Руммель, 1889], первой половиной XX в.

[Глушков, 1926; Божич, 1927; Визе, 1927; Карбасников, 1927; Антонов, 1929; Дзенс-Литовский, 1937; Архангельский и Страхов, 1938], серединой XX в. [Зенкович, 1946, 1948, 1958, 1958а, 1960, 1962; Буданов, 1949; Невесский, 1957, 1967; Братусь, 1965, 1965а], а также отдельными работами в конце XX в. [Шуйский 1974, 1982; Геология шельфа УССР..., 1985] и начале XXI в. [Шнюков, 2003; Шуйский, 2005, 2007; Иванов и др., 2006].

Наиболее ранние сведения о гранулометрическом составе донных наносов Лименского залива представлены в работах [Белов, 1938; Зенкович, 1958, 1962; Геология шельфа УССР..., 1982], а основные факторы, контролирующие поступление терригенного материала в акваторию залива, отражены в работах [Наседкин, 2005, 2009]. Современные данные о гранулометрическом составе донных наносов Лименского залива отсутствуют.

Изучение донных наносов Балаклавской бухты носит эпизодический характер. Тем не менее, первые сведения о структуре наносов получены уже в конце XIX столетия [Вериге, 1888], в дальнейшем изучению береговой и прибрежной зон посвящены работы [Зенкович, 1958, 1960]. Современные сведения о физико-химических свойствах донных наносов отражены в работах [Миронов и др., 1999; Киселева и Просвилов, 2006; Овсяный и др., 2009; Алёмов, 2010]. Исследованию гранулометрического состава в этих работах уделено мало внимания.

Таким образом, основываясь на данных о скоростях осадконакопления в прибрежных районах Крыма [Денисов, 2018; Мирзоева и др., 2018], можно предположить, что сведения о структуре наносов, полученные ранее, сильно устарели, не отображают реальной картины и требуют обновления. Получение новых данных позволит более детально изучить особенности формирования донных наносов в условиях антропогенной нагрузки.

Применению методов математического моделирования для изучения особенностей динамики наносов прибрежной и береговой зон Каламитского залива посвящены работы [Фомин и Иванов, 2005; Горячкин и др. 2009, 2013; Удовик и Горячкин, 2013, 2015, Харитоновна и Фомин, 2017; Korzinin, 2017]. Для

участка Южного берега Крыма, включающего район Лименского залива, исследование процессов эрозии и седиментации донных наносов с использованием численной модели *XBeach* ранее уже проводилось [Алексеев, 2013]. Однако в представленных работах исследование динамики наносов были сделаны без учета региональных особенностей их гранулометрического состава и требуют корректировки. Несмотря на то, что для акватории Балаклавской бухты выполнялись работы по изучению особенностей циркуляции вод [Ациховская и Субботин, 2000], в том числе методами математического моделирования [Кубряков и Попов, 2005; Фомин и Репетин, 2005], моделирование динамики донных наносов в данном районе не проводилось.

Исследование региональных особенностей формирования и эволюции размерного состава прибрежно-морских наносов на участках побережья Западного и Южного берегов Крыма является особенно актуальным в связи с существенным увеличением темпов освоения рекреационного потенциала данных регионов. Недостаточная изученность штормовых и сезонных изменений размерного состава донных наносов и наносов береговой зоны создает значительные трудности при планировании различного рода мероприятий для сохранения и устойчивого развития прибрежных территорий. Неточности в оценках исследуемых параметров зачастую приводят к разрушению объектов прибрежной инфраструктуры, жилых построек, берегозащитных и других гидротехнических сооружений, что в значительной степени снижает инвестиционную привлекательность каждого конкретного участка побережья [Гуров и др., 2019].

Изучение процессов, происходящих на границе суша – море, в том числе региональных особенностей динамики рельефа береговой зоны и перераспределения фракций наносов на прибрежных участках, включает проведение комплекса натурных наблюдений, а также применение широкого спектра математических моделей и расчетных методик для прогноза развития берегов на различных пространственных и временных масштабах [Анцыферов и Косьян, 1986; Van Rijn et al., 1993, 2011; Ferre et al., 2005; Леонтьев, 2008, 2012,

2018, 2019; Roelvink et al., 2009; Reniers et al., 2013; Bugajny et al., 2013; Williams et al., 2015; Леонтьев и др., 2015; Bakhtyar et al., 2016; Кузнецова и Сапрыкина, 2017, 2019; Гуров и др., 2019]. В большинстве исследований при моделировании штормовых деформаций рельефа береговой зоны используются значения крупности наносов, осредненные для всей расчетной области [Леонтьев, 2015; Корзинин, 2015], а также не учитывается их пространственная или временная изменчивость [Korzinin, 2017]. Однако именно гранулометрический состав донных наносов во многом определяет характеристики их перемещения под воздействием волн и течений [Гуров и др., 2019]. Особое значение точные данные о размерном составе донных наносов имеют при адаптации и валидации моделей, описывающих литодинамические процессы на участках береговой зоны [Гуров, 2018; Гуров и др., 2019]

Исследования, выполненные в работах [Ruessink et al., 2007; Gallagher et al., 1998, 2011; Reniers et al., 2013; Prodger et al., 2017] показывают, что даже небольшие вариации в размере фракций могут иметь существенное влияние на результаты моделирования изменений морфологии пляжа. Включение пространственных неоднородностей гранулометрического состава наносов в модели переноса наносов дает возможность связать особенности прибрежной морфодинамики и долгосрочных изменений береговой линии с особенностями геологического строения исследуемых районов [McNinch, 2004; Гуров и Фомин, 2021a]. В работе [Ferre et al., 2005] с применением данных натуральных измерений и модельных расчетов величин концентрации взвешенных наносов отмечены особенности динамики мелкозернистой фракции ($<0,06$ мм) в результате шторма. Согласно результатам работы [Prodger et al., 2017], профили гранулометрического состава наносов береговой зоны связаны с диссипацией энергии обрушающихся волн, причем наблюдаемые максимальные размеры зерен и их сортировка соответствовали местоположению пиковой диссипации энергии [Гуров и Фомин, 2021a]. В работе [Reniers et al., 2013] сведения о размерном составе, в сочетании с данными батиметрических съемок, использовались для верификации модельных расчетов. В работе [Yu et al., 2013] установлено, что различный уровень

энергетических условий, определяемый морфометрическими характеристиками пляжей, а также гранулометрическим составом наносов береговой зоны, отвечает за способность пляжей восстанавливаться после штормов [Гуров и Фомин, 2021а].

Таким образом, проведение исследований, основанных на получении экспериментальных натуральных данных и результатов численного моделирования гранулометрического состава донных наносов с целью оценки пространственно-временных особенностей перераспределения песчаных фракций под воздействием штормовых условий различной интенсивности, является актуальной задачей. Учет особенностей протекания этих процессов может быть использован при принятии решений, направленных на рациональное использование ресурсов прибрежной зоны [Гуров и др., 2016].

Цель и задачи исследования – целью диссертационной работы является выявление факторов формирования и динамики распределения фракций гранулометрического состава донных наносов прибрежных районов Крыма, оценка влияния различных гидродинамических условий на пространственно-временные особенности распределения размерных фракций донных наносов в прибрежных районах Крымского полуострова.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Получить новые экспериментальные данные о количественных характеристиках гранулометрического состава (долевое содержание фракций, средний диаметр частиц и коэффициент сортировки) донных наносов прибрежной и береговой зон исследуемых районов Крыма (Каламитский залив, Лименский залив, Балаклавская бухта);
2. Выделить основные особенности пространственной изменчивости фракций гранулометрического состава донных наносов и оценить влияние различных гидрометеорологических факторов и процессов на их перераспределение в поверхностном слое донных наносов прибрежной и береговой зон для различных районов Крыма;
3. Сформировать массивы данных о пространственном распределении фракций наносов и рельефе дна для их использования в качестве начальных условий

для математической модели *XBeach* и верификации результатов численного моделирования;

4. Выполнить исследование механизмов перераспределения фракций различной крупности по профилю подводного берегового склона при различных параметрах волнения с использованием одномерного и двумерного вариантов численной модели *XBeach*;
5. Используя данные натурных измерений и результаты численных расчетов, оценить региональные пространственно-временные особенности распределения гранулометрических фракций под воздействием штормового волнения в различных прибрежных районах Крыма.

Объект исследования – поверхностный слой донных наносов прибрежной и береговой зон Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты.

Предмет исследования – гранулометрический состав донных наносов, его пространственная изменчивость и факторы формирования.

Научная новизна полученных результатов

1. Для прибрежной и береговой зон Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты сформирован уникальный массив данных о гранулометрическом составе донных отложений, что позволило определить структуру их пространственного распределения.

2. Впервые для Каламитского, Лименского заливов и Балаклавской бухты на основе комплексной морфодинамической модели *XBeach* определены особенности процессов эрозии и седиментации донных наносов на подводном склоне под воздействием штормового волнения с учетом их фракционного состава.

3. Установлено, что в Каламитском заливе на перемещения наносов волнами значительное влияние оказывает их фракционный состав и расположение границ раздела между фракциями. Наиболее интенсивное перемещение фракций происходит при расположении границы их раздела на глубинах до 4 м.

4. Установлено, что в Лименском заливе основными факторами, определяющими перемещение наносов под воздействием волн, являются глубина

и уклон дна, орография берега и направление волнения. Крупнозернистый материал концентрируется в прибрежной зоне у мысов, создающих зоны волновой тени. Среднезернистые фракции выносятся из береговой зоны и отлагаются в центральной части залива, а мелкозернистый материал накапливается на участках с малыми уклонами дна.

5. Динамика донных наносов в акватории Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения исследована впервые. Показано, что, несмотря на замкнутость и изолированность северного бассейна бухты, здесь возникает перераспределение фракций наносов от западного берега к восточному. Установлено, что изменения уклонов дна между изобатами 6–8 м в акватории южного бассейна бухты приводят к осаждению крупных и средних фракций, а на участке между изобатами 9–12 м – мелкозернистого песка.

Теоретическая и практическая значимость работы

Работа посвящена комплексным исследованиям гранулометрического состава донных наносов в прибрежной зоне бесприливного моря и оценке региональных пространственно-временных особенностей распределения гранулометрических фракций под воздействием штормового волнения на примере открытого мелководного залива Западного Крыма (Каламитский залив), открытого приглубого залива Южного Крыма с активной динамикой вод (Лименский залив) и закрытой бухты с ограниченным водообменом и изрезанной береговой линией (Балаклавская бухта). Полученные результаты расширяют современные представления о структуре и пространственной изменчивости распределения донных наносов в прибрежных районах и береговой зоне Крыма, характере перераспределения крупно-, средне- и мелкозернистых фракций под воздействием штормовых условий для акваторий, отличающихся орографией берега, рельефом дна и особенностями гидродинамики.

Полученные данные натурных измерений и результаты численных расчетов восполняют недостаток информации о структуре и факторах формирования донных наносов в прибрежных районах Крыма. Полученные результаты в

дальнейшем могут быть использованы при планировании берегозащитных мер, направленных на рациональное использование ресурсов береговой зоны.

Методология и методы исследования

Отбор проб поверхностного слоя донных наносов, используемых для анализа в данной работе, осуществлялся с помощью дночерпателя Петерсона или ДЧ-0,025 (площадь охвата 0,025 м²).

В рамках поставленных задач по формированию массива данных для настоящей работы были отобраны новые пробы поверхностного слоя донных наносов в период с 2005 по 2019 гг. В акватории Каламитского залива было отобрано 10 проб в мористой части (август 2011 г. на НИС «Профессор Водяницкий») и 5 проб в прибрежной (сентябрь 2012 г. на НИС «Риони»). Дополнительно в береговой зоне Каламитского залива в период с 2015 по 2018 г. было отобрано 50 проб наносов на профиле «урез-пляж». В Лименском заливе сбор материалов проводился в ноябре 2012 г. при выполнении комплексных гидролого-гидрохимических исследований на Черноморском подспутниковом гидрофизическом полигоне ФГБУН ФИЦ МГИ, всего было отобрано 12 проб донных наносов. В акватории Балаклавской бухты в период с 2005 по 2019 г была отобрана 51 проба.

В диссертационной работе для определения гранулометрического состава наносов использовался комбинированный метод декантации и рассеивания. Для моделирования динамики прибрежной зоны применялась модель *XBeach* – комплексная гидродинамическая модель, описывающая динамику волн и течений, транспорт наносов и изменения рельефа дна, а также процессы осушения и затопления береговой зоны. Полученные экспериментальные данные анализировались с применением методов статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Массив современных натуральных данных о гранулометрическом составе донных наносов для прибрежной и береговой зон Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты, созданный на основе экспедиционных измерений.

2. Закономерности пространственного распределения донных наносов, которые для Каламитского и Лименского заливов характеризуются наличием двухвершинной диаграммы содержания фракций, образованных крупно- и мелкозернистыми частицами, а для Балаклавской бухты – преимущественным накоплением мелкозернистого материала. Граница накопления илистых наносов в Каламитском заливе расположена на глубинах 3–3,5 м, а в Лименском заливе – на глубинах 15–25 м.

3. Характеристики динамики гранулометрических фракций и морфодинамические изменения в Каламитском заливе, которые происходят на участке 100-метровой зоны, ограниченной изобатой 2,5–3 м, и определяются параметрами и интенсивностью ветрового волнения, а также положением границы разделения фракций по крупности.

4. Схема перераспределения фракций донных наносов в Лименском заливе, которое определяется орографией берега, высотами волн и профилем дна, а также ограничивается изобатой 20 м.

5. Особенности динамики гранулометрических фракций для района Балаклавской бухты под воздействием интенсивных южных штормов, заключающиеся в перераспределении материала наносов северного бассейна бухты от западного берега к центральной части и к восточному берегу, несмотря на его замкнутость и изолированность. Расположение областей максимальных концентраций наносов определяется коленовидной узостью, разделяющей северный и южный бассейны, а ширина областей накопления фракций меняется с изменением направления волнения.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Отбор донных наносов проводился с помощью дночерпателя Петерсона или ДЧ-0,025 (площадь охвата 0,025 м²) в соответствии с требованиями нормативных документов и межгосударственного стандарта (ГОСТ, 1984; ISO, 2004).

Гранулометрический состав наносов определялся с помощью комбинированного ситового метода (метод декантации и рассеивания). Отделение алеврито-пелитовой фракции ($\leq 0,05$ мм) выполнялось мокрым просеиванием с

последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции ($>0,05$ мм) разделялись ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит. Полученные в работе натурные данные не противоречат результатам исследований, опубликованным другими авторами в современных публикациях, для районов с похожими физико-географическими и океанологическими условиями.

Результаты расчетов получены с помощью численной гидродинамической модели *XBeach* – свободно распространяемого программного продукта с открытым кодом (<http://oss.deltares.nl/web/xbeach/home>), которая поддерживается и развивается международным консорциумом (UNESCO, Deltares, Delft University of Technology, University of Miami). Работы по верификации результатов численных расчетов с использованием модели *XBeach* широко представлены в публикациях зарубежных авторов для различных прибрежных районов по всему миру.

Связь с научными программами, планами, темами

Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Морского гидрофизического института НАН Украины и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках следующих научно-исследовательских проектов и грантов:

- тема «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гритехнологий» (шифр «Фундаментальная океанография»), № 0111U001420 (2011–2015 гг.), исполнитель;
- тема «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гритехнологий» (шифр «Фундаментальная океанология») № 0827-2014-0010 (2014–2017 гг.) исполнитель;

- тема «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования») № 0827-2018-0004, (2018–2020), исполнитель;
- грант РФФИ «Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных осадков в прибрежной зоне западного Крыма» № 18-35-00230 мол_a, руководитель;
- грант РФФИ «Геохимия загрязняющих веществ донных отложений Балаклавской бухты (Черное море)» № 18-45-920007, исполнитель.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы представлялись на семинарах отдела биогеохимии моря, а также на различных молодежных и международных научных конференциях: Международная научная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России» (пгт Качивели, сентябрь 2014 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015», (г. Севастополь, апрель 2015 г.); Научно-практическая конференция «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова», (г. Севастополь, сентябрь 2015 г.); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования», (г. Севастополь, апрель 2016 г.); Международная конференция EMECS'11 Seacoasts XXVI “Managing risks to coastal regions and communities in a changing world” (г. Санкт-Петербург, август 2016 г.); II Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Москва, апрель 2017 г.); Научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, октябрь 2017 г.); Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 17 (Mellieha, Malta, October-November 2017); III Всероссийская научная конференция молодых ученых, «Комплексные исследования Мирового океана (КИМО-2018)»

(г. Санкт-Петербург, май 2018 г.); 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2018, (Albena, Bulgaria, July 2018); XXVII Международная береговая конференция «Арктические берега: путь к устойчивости» (г. Мурманск, сентябрь 2018 г.); Всероссийская научная конференции молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана (КИМО-2019)» (г. Севастополь, апрель 2019 г.); Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 19 (Marmaris, Turkey, October 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 20 научных работ, из них 10 статей в рецензируемых научных изданиях [1–4, 6–11], 1 статья в рецензируемом сборнике научных трудов [5] и 9 тезисов и материалов докладов на Всероссийских и Международных научных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 11 работ в рецензируемых научных изданиях [1–11]. В их числе 6 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [2–4, 6, 7, 11], 3 работы в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [6, 7, 11], 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук [5, 8–10] и 1 работа [1] в издании, соответствующем п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанными гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах:

1. **Гуров К.И.** Геохимические характеристики донных отложений акватории Каламитского залива Черного моря / **К.И. Гуров**, Е.И. Овсяный, Е.А. Котельянец, С.К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 5. – С. 69–80.

2. **Gurov K.I.** Factors of formation and features of physical and chemical characteristics of the bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / **K.I. Gurov**, E.I. Ovsyany, E.A. Kotelyanets, S.K. Konovalov // Physical Oceanography. – 2015. – № 4. – P. 46–52. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-4-46-52. (**Гуров К.И.** Факторы формирования и отличительные особенности физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / **К.И. Гуров**, Е.И. Овсяный, Е.А. Котельянец, С.К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 4. – С. 51–58. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-4-51-58).

3. Ovsyany E.I. Research of organic carbon and carbonate content in the bottom sediments of the Crimean Southern coast shelf / E.I. Ovsyany, **K.I. Gurov** // Physical Oceanography. – 2016. – № 1. – P. 60–70. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-1-60-70. (Овсяный Е.И. Исследование органического углерода и карбонатности в донных осадках шельфа Южного берега Крыма / Е.И. Овсяный, **К.И. Гуров** // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – № 1. – С. 62–72. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-1-62-72).

4. Orekhova N.A. Organic matter and grain-size distribution of the modern bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / N.A. Orekhova, E.I. Ovsyany, **K.I. Gurov**, M.A. Popov // Physical Oceanography. – 2018 – 25(6). – P. 479–488. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-6-479-488. (Орехова Н.А. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты / Н.А. Орехова, Е.И. Овсяный, **К.И. Гуров**, М.А. Попов // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34, № 6 (204). – С. 523–533. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-6-523-533.).

5. **Гуров К.И.** Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива / К.И. Гуров // Экологическая

безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – №. 3. – С. 56–63. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-56-63.

6. **Gurov K.I.** Modeling of the coastal zone relief and granulometric composition changes of sediments in the region of the Bogaily Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during storm / **K.I. Gurov**, V.F. Udovik, V.V. Fomin // *Physical Oceanography*. – 2019. – 26(2). – P. 170–180. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-170-180. (**Гуров К.И.** Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) / **К.И. Гуров**, В.Ф. Удовик, В.В. Фомин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2019. – Т. 35, № 2 (206). – С. 185–196. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-185-196.).

7. Kotelyanets E.A. Pollutants in bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / E.A. Kotelyanets, **K.I. Gurov**, E.A. Tikhonova, S.I. Kondratev // *Physical Oceanography*. – 2019. – 26(5). – P. 414–424. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-414-424. (Котельянец Е.А. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е.А. Котельянец, **К.И. Гуров**, Е.А. Тихонова, С.И. Кондратьев // *Морской гидрофизический журнал*. – 2019. – Т. 35, № 5. – С. 469–480. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-469-480.).

8. Тихонова Е.А. Содержание органических веществ и тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты (Чёрное море) / Е.А. Тихонова, Е.А. Котельянец, **К.И. Гуров** // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2019. – №. 3. – С. 82–89. DOI:10.22449/2413-5577-2019-3-82-89.

9. **Гуров К.И.** Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива / К.И. Гуров // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2020. – №. 1. – С. 36–46. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-1-36-46.

10. Котельянец Е.А. Влияние физико-химических характеристик донных отложений на распределение микроэлементов на примере акваторий с различной антропогенной нагрузкой (Черное море) / Е.А. Котельянец, **К.И. Гуров** //

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – №. 4. – С. 117–129. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-4-117-129.

11. **Gurov K.I.** Mathematical modeling the dynamics of the bottom sediments granulometric composition in the Balaklava Bay affected by the wind waves / **K.I. Gurov**, V.V. Fomin // *Physical Oceanography*. – 2021. – 28(1). – P. 78–89. DOI:10.22449/1573-160X-2021-1-78-89. (**Гуров К.И.** Математическое моделирование динамики гранулометрического состава донных отложений Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения / **К.И. Гуров**, В.В. Фомин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2021. – Т. 37, № 1. – С. 85–97. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-1-85-97.).

Тезисы докладов на Всероссийских и международных конференциях:

12. **Гуров К.И.** Основные геохимические свойства донных осадков и их влияние на экологические характеристики прибрежных районов Черного моря / **К.И. Гуров**, Е.И. Овсяный, Е.А Котельянец, С.К. Коновалов // Тезисы докладов Международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России», (15–18 сентября 2014, г., Кацивели). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 63–65.

13. **Гуров К.И.** Исследование гранулометрического и химического состава донных осадков шельфа южного побережья Крыма / **К.И. Гуров**, Е.И. Овсяный, Е.А Котельянец, С.К. Коновалов // *Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015»*. – Севастополь: ООО «Экспресс – печать», 2015. С. 31–32.

14. **Гуров К.И.** Особенности физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты / **К.И. Гуров**, Е.И. Овсяный, С.К. Коновалов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Пути решения проблемы сохранения и восстановления пляжей Крымского полуострова» (16 – 18 сентября 2015 г. Севастополь) – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. С. 100–101.

15. Fomin V.V. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V.V. Fomin, **K.I. Gurov**, V.F. Udovik,

S.K. Konovalov // Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. The Sea Shore. 2017. P. 1–1. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4315210e16 URL: https://seacoasts.editorum.io/en/nauka/conference_article/1783/view (Date of access 05.12.2017).

16. **Гуров К.И.** Моделирование штормовых изменений рельефа дна и гранулометрического состава донных отложений на участке береговой зоны Крымского полуострова / **К.И. Гуров**, В.В. Фомин, В.Ф. Удовик // Тезисы докладов научной конференции «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (3 – 7 октября 2017 г). г. Севастополь, С. 138–139.

17. **Gurov K.I.** The dynamics of sediments grain-size in Limensky Gulf / **K.I. Gurov**, V.V. Fomin // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Editor E. Ozhan), MEDCOAST 17, 31 Oct – 04 Nov 2017, Mellieha, Malta, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Dalyan, Mugla, Turkey, 2017, vol. 2. P. 925–935.

18. **Gurov K.I.** Estimation of the trace metals accumulation in bottom sediments and their connection with the granulometric composition / **K.I. Gurov**, E.A Kotelyanets // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2018, Conference Proceedings, ISBN / ISSN 1314-2704, 2 July – 8 July, 2018 Albena, Bulgaria, Vol. 18, Issue 3.2, P. 1127–1134.

19. **Гуров К.И.** Особенности динамики гранулометрического состава донных отложений Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения // Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана (КИМО-2019)», г. Севастополь, 22–26 апреля 2019 г. С. 274–275.

20. **Gurov K.** Sediments Granulometric Composition Dynamics in the Kalamitsky Gulf / **Gurov K.**, Fomin V., Alekseev D., Ivancha E. // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Editor E. Ozhan), MEDCOAST 19, 22 –

26 Oct 2019, Marmaris, Turkey, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Ortaca, Mugla, Turkey, 2019, vol. 2, P. 597–606.

Личный вклад

Постановка задач диссертационной работы проводилась соискателем совместно с научным руководителем д. геогр. н. С.К. Коноваловым. Аналитический обзор работ по теме исследования проводился соискателем лично. Им лично осуществлялся отбор проб донных наносов в экспедициях в Лименском и Каламитском заливах, а также в Балаклавской бухте. Выбор методики гранулометрического анализа, выполнение анализа, а также расчет количественных характеристик гранулометрического состава (долевое содержание фракций, средний диаметр частиц и коэффициент сортировки) проводились соискателем лично. Интерпретация данных натурных измерений, а также выявление основных особенностей пространственной изменчивости гранулометрического состава донных наносов в прибрежных акваториях Крыма, отличающихся очертаниями береговой линии, рельефом и уклонами дна и суши, а также особенностями гидродинамики, проводились автором самостоятельно. Формирование массивов данных о пространственном распределении фракций наносов и рельефе дна для их использования в качестве начальных условий в математических расчетах выполнялись соискателем самостоятельно.

Соискатель принимал участие в проведении численных экспериментов по моделированию влияния штормовых условий на изменение пространственного распределения гранулометрических фракций донных наносов в Каламитском заливе, Лименском заливе и Балаклавской бухте.

Автором осуществлен анализ и интерпретация результатов численных расчетов динамики донных наносов под воздействием интенсивного штормового волнения в прибрежной зоне Каламитского и Лименского заливов, а также в Балаклавской бухте.

Обсуждение результатов отдельных этапов исследования осуществлялось соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных

публикаций. Соискатель лично представлял результаты работы на российских и международных конференциях, семинарах и школах.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д-ру геогр. наук С.К. Коновалову за неоценимую помощь и ценные советы при подготовке работы. Автор искренне признателен д-ру физ.-мат. наук В.В. Фомину (ФГБУН ФИЦ МГИ), д-ру геогр. наук Е.И. Игнатову (МГУ), В.Ф. Удовикю (ФГБУН ФИЦ МГИ), Е.И. Овсяному (ФГБУН ФИЦ МГИ), д-ру геогр. наук Ю.Н. Горячкину (ФГБУН ФИЦ МГИ), канд. геогр. наук В.В. Крыленко (ЮО ИО), канд. физ.-мат. наук Д.В. Алексееву (ФГБУН ФИЦ МГИ) за плодотворные дискуссии и поддержку на разных этапах выполнения работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Объем работы составляет 166 страниц и содержит 13 таблиц и 47 рисунков. Библиографический список включает в себя 175 наименований, в том числе 47 на английском языке.

ГЛАВА 1 ДОННЫЕ НАНОСЫ И ФАКТОРЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ КРЫМА

1.1 Классификация прибрежных морских наносов

Донные наносы современных и древних морей Земли составляют более 75% общего объёма осадочной оболочки материковой земной коры [Ажгирей, 1971].

Классифицировать донные наносы начали еще в конце XIX века. Комплексность подхода, основанная на анализе вещественного и гранулометрического состава наносов, а также условиях их образования получила широкое распространение и используется в настоящее время. Именно комплексного подхода придерживались и отечественные океанологи, такие как Архангельский Д.А., Страхов Н.М., Рухин Л.Б., Зенкович В.П., Безруков П.Л. и Лисицын А.П.

В основе комплексной классификации лежит механический состав наносов, определяемый такими физическими параметрами как: медианный диаметр частиц и коэффициент сортировки [Страхов и др., 1954; Страхов, 1963]. Медианный диаметр – средний размер зерен, по отношению к которому одна половина зерен, слагающих образец наносов, будет крупнее, а другая — мельче. Коэффициент сортировки – мера отклонения размера частиц пробы от их средней величины или мера разбросанности частиц по фракциям (стандартное отклонение). Комплексный подход к классификации наносов современных водоемов использовался в Институте океанологии РАН Безруковым П.Л. и Лисицыным А.П. [Безруков и Лисицын, 1960], а составленная ими классификация является продолжением работ Страхова Н.М. В основе данной классификации лежит метод преобладающих фракций, определяющих название наносов [Швецов, 1958]. Числовые границы между типами осадков установлены по распространенной десятичной системе (гравий от 10 до 1 мм, песок от 1,0 мм до 0,1 мм, алеврит от 0,1 до 0,01 мм) (Таблица 1.1) [Лисицын, 1974]. Приведенная классификация хорошо применима как для открытых частей морей и океанов, так

и для прибрежных, мелководных акваторий. Именно она и используется для описания особенностей фракционного состава донных наносов, исследуемых в данной работе.

Таблица 1.1 – Классификация морских донных наносов по размерным фракциям [Безруков и Лисицын, 1960; Лисицын, 1974]

Наименование фракций		Размер фракций, мм
Валунная	Валунная	>100
Галечная	Крупногалечная	100–50
	Среднегалечная	50–25
	Мелкогалечная	25–10
Гравийная	Крупногравийная	10–5
	Среднегравийная	5–2,5
	Мелкогравийная	2,5–1,0
Песчаная	Крупнопесчаная	1,0–0,5
	Среднепесчаная	0,5–0,25
	Мелкопесчаная	0,25–0,1
Алевритовая	Крупноалевритовая	0,1–0,05
	Мелкоалевитовая	0,05–0,01
Пелитовая или глинистая	Крупнопелитовая	0,01–0,005
	Среднепелитовая	0,005–0,001
Субколлоидная	Субколлоидная	<0,001

Неоднородность гранулометрического состава наносов в прибрежной зоне привела к тому, что описанную выше классификацию, выраженную в однозначном наименовании механического состава необходимо уточнять. Поэтому в работе [Швецов, 1958] автор рекомендует сначала описывать максимально представленную фракцию, а затем в порядке убывания их содержания указывать процентное содержание остальных частей.

1.2 Факторы формирования и динамики донных наносов в прибрежных районах Крыма

Среди различных факторов, определяющих формирование и динамику донных наносов, в данной работе нас будут интересовать те, которые важны для прибрежной части моря. К таким факторам относятся глубина и рельеф акватории и прилегающей территории суши, особенности орографии берегов, характер течений, биологическая активность, поступление терригенного и биогенного материала [Твенхофел, 1936; Пустовалов, 1940; Лисицын, 1971; Романовский, 1988].

Глубина бассейна оказывает влияние на пространственное распределение донных наносов: в более глубоких районах преобладают мелкодисперсные илы, ближе к берегу, они сменяются песчаной и гравийной фракциями. Граница раздела песчано-гравийных и песчано-алевритовых наносов в прибрежной зоне и алеврито-пелитового материала в мористой части акватории называется «иловая линия». В открытых мелководных морях эта линия проходит на глубинах 200 м, во внутриконтинентальных морях – на глубине 20–30 м [Рухин, 1969].

С увеличением глубины крупность материала уменьшается, однако скорость и характер этих изменений определяется сложностью рельефа в разных его участках [Страхов, 1960]. Рухин Л.Б. [Рухин, 1969] отмечает, что в зависимости от гидродинамического режима на одной и той же глубине могут накапливаться различные по гранулометрическому составу наносы. Поэтому удаленность от берега в ряде случаев сказывается более резко на характере наносов, чем глубина. Замкнутость бассейна и особенности рельефа берега также оказывают влияние на особенности распределения материала по крупности [Страхов, 1960]. Иногда в мелководных лагунах образуются более тонкозернистые наносы, чем в глубоком море [Рухин, 1969]. Особенности накопления илистых наносов в замкнутых мелководных акваториях будут рассмотрены дальше на примере Балаклавской бухты.

Значительное влияние на формирование наносов оказывает рельеф областей седиментации, в частности рельеф морского дна [Невесский, 1967]. От рельефа морского дна зависит и гидродинамический режим, в значительной степени определяющий формирование распределения наносов. Относительно пониженные участки морского дна являются, как правило, местами быстрого накопления наносов. На подводных возвышенностях наоборот часто не только не происходит отложения наносов, но даже размываются более древние породы [Рухин, 1969]. Важную роль в распределении материала наносов играет угол наклона дна. Для акваторий с более пологим наклоном дна характерны более мощные и широкие отложения песков, с увеличением наклона тонкодисперсные илы подходят ближе к берегу, а полоса песков в прибрежной зоне сокращается [Страхов и др., 1954]. Даже незначительные изменения в рельефе сказываются на крупности наносов. Наличие депрессий, даже слабо выраженных, характеризуется накоплением в этих районах более мелкодисперсного материала. Сортировка материала также зависит от гидродинамических процессов. Например, на больших глубинах, при увеличении доли мелкозернистых фракций, сортировка ухудшается, в отличие от малых глубин, где под воздействием волновых процессов отлагается грубозернистый материал, а его сортировка улучшается [Невесский, 1967].

На накопление наносов влияет не только рельеф области отложения, в частности морского дна, но и рельеф суши. Рельеф суши сказывается на интенсивности разрушения берегов, что влияет на поступление осадочного материала, в значительной мере определяющего состав наносов [Рухин, 1969]. Особенное значение этот фактор играет для пологих аккумулятивных берегов Каламитского залива. Наклон пляжа сказывается на движении частиц наносов. По более пологому берегу вода пройдет заметно большее расстояние, что приведет к накоплению мелкозернистого материала в верхней части пляжа. Кроме того, в случае пологого пляжа, сформированного материалом незначительной крупности, перемещение потока значительно усиливается. Если пляжевый материал представлен крупнозернистыми частицами – это приведет к увеличению крутизны склона и тем самым к сокращению пути движения частиц [Зенкович,

1946]. В дальнейшем особенности рельефа и гранулометрического состава для участков береговой зоны Каламитского залива будут учтены в работе при моделировании динамики донных наносов.

Кроме рельефа суши, важное значения для динамики донных наносов играет очертание береговой линии. Например, сложное геологическое строение побережья Южного берега Крыма обусловило формирование абразионно-бухтового и абразионно-оползневого типа берега в условиях горного рельефа [Геология шельфа УССР..., 1982]. В результате, береговая линия представляет собой чередование вогнутых (бухты) и выпуклых (мысы) участков. Изрезанность береговой линии и особенности рельефа дна привели к тому, что на участке Южного берега Крыма существуют незначительные короткие потоки наносов, разделенные «непропусками» в виде мысов и зонами дивергенции. Более подробно влияние орографии берега будет рассмотрено в настоящей работе на примере Лименского залива (открытого района Южного берега Крыма) и Балаклавской бухты (закрытая акватория).

Для отдельных районов Черного моря, особенно отличающихся своим физико-географическим расположением, таких как: бухты, заливы или дельты рек, важными факторами, влияющими на поступление, перемещение и накопление наносов являются особенности их гидрологического режима. К таким факторам можно отнести влияние речного стока, скорости и направленности течений, а также интенсивность ветрового волнения.

От речного стока напрямую зависит количественный и качественный составы поступающего в акваторию материала [Страхов и др., 1954]. Речной сток – доминирующий источник поступления твердого вещества в акваторию в целом [Лисицын, 1978]. Особенностью обломочного материала, переносимого дождевыми и талыми водами, являются его мелкозернистость и плохая сортированность [Лопатин, 1952; Рухин, 1969; Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1975]. Для прибрежных районов Черного моря, полоса илов, выносимая крупными реками оконтуривается полосой песков, тем самым отделяя приустьевые илы от глубоководных наносов [Страхов и др., 1954]. Однако,

учитывая сильную зарегулированность в первую очередь рек Западного Крыма в последние несколько десятков лет, вклад этого источника существенно сократился. Реки Южного берега Крыма короткие, крутопадающие водотоки, отличающиеся незначительными площадями водосбора [Геология шельфа УССР..., 1982]. Поступление терригенного материала со стоком р. Лименки, впадающей в Лименский залив, и р. Балаклавки, впадающей в акваторию Балаклавской бухты, незначительно. Поэтому речной сток, как фактор формирования донных наносов, для исследуемых в настоящей работе районов рассматриваться не будет.

Влияние течений характеризуется наличием языков распространения терригенного материала. Течения выносят обломочные частицы в море дальше, чем они бы могли попасть естественным путем [Страхов и др., 1954]. В настоящей работе влияние течений, как отдельного фактора, не рассматривается. Для динамики донных наносов учитывается влияние течений сформированных в результате ветро-волнового воздействия.

Роль морского волнения в динамике береговой и прибрежной зон велика. При воздействии ветра на водную толщу в поверхностном слое возникает ветровое волнение со значительными потенциальной и кинетической энергиями. Считается, что глубина, на которой еще проявляется волновое воздействие, составляет $\frac{1}{2}$ длины волны. На мелководье волны испытывают воздействие рельефа на свои параметры. Процесс распространения волны становится нелинейным, осуществляет перенос масс воды в направлении берега [Зенкович, 1946]. В результате ветровые волны или волны зыби осуществляют абразию берега и морского дна и являются поставщиками наносов в море. Исходя из оценок волновой энергии, можно предположить, что основными факторами, определяющими энергетику ветровых волн при воздействии на прибрежную зону, являются: экспозиция берега по отношению к преобладающему направлению ветра, ширина активного волнового воздействия на дно и особенности профиля береговой зоны, в пределах которой происходит рассеивание части энергии волны за пределы зоны [Иванов и др., 2006].

Скорость разрушения морских берегов, выступающих в море, может быть очень велика. В зависимости от пород, слагающих берега, скорости абразии меняются от нескольких мм/год для массивных кристаллических пород до нескольких метров и даже десятков метров в год для рыхлых пород [Зенкович, 1946]. Однако скорость абразии берега, сложенного любыми породами, постепенно уменьшается по мере выработки некоторого предельного профиля равновесия морского дна. На скорость абразии влияет ряд особенностей движения воды в прибрежной зоне. Морская абразия становится очень ощутимой при значительной протяженности береговой линии [Рухин, 1969]. Главным фактором, влияющим на интенсивность процессов абразии, является направление и сила ветра, которые, в свою очередь, определяют энергию волнения. В зависимости от направления ветра по отношению к береговой линии определяется интенсивность разрушения берегового склона и изменения размерности твердых частиц, которые переводятся во взвешенное состояние. [Рухин, 1969]. Особую роль в протекании абразионно-аккумулятивных процессов в береговой зоне играют штормовые нагоны [Блатов и Иванов, 1992]. Эти процессы сопровождаются интенсивным транспортом донных и взвешенных наносов. Сокращение ширины пляжей в связи с увеличением темпов антропогенного воздействия в XX в. (добыча песка в прибрежной зоне, зарегулирование стока рек, строительство в береговой зоне) привело к интенсификации абразионного размыва. Именно этот аспект и будет в дальнейшем исследоваться на примере берега Каламитского залива в районе пгт Николаевка. Для акватории Лименского залива роль абразионных процессов в формировании донных наносов подтверждается результатами исследования минералогического состава взвешенного вещества в заливе, основными компонентами которого являются глинистые частицы, обломочные зерна кварца, кальцит, органические остатки [Наседкин, 2005; Овсяный и Гуров, 2016].

Говоря об интенсивности ветра, ветровом волнении и характеристиках придонных течений нужно сказать, что взаимосвязь этих параметров является движущей силой вдольбереговых потоков наносов. Согласно результатам работы Шуйского Ю.Д. [Шуйский, 2005], в пределах северо-западного Крыма можно

выделить три ячейки системы вдольберегового потока наносов. Каждая представляет собой систему двусторонних разнонаправленных вдольбереговых миграций с результирующим переносом в направлении распространения большей части волновой энергии. Наибольший интерес в данной работе представляют исследования, проведенные для ячейки, включающей акваторию Каламитского залива. Результаты в этой ячейке дали однозначное направление потока от района м. Лукулл в сторону Евпаторийской бухты. Соотношение количества волновой энергии в северном направлении равно 78%, а в южном 22%. Другими словами, по ячейке распределяется 117 тыс. м³/год (91 тыс. км³/год в северном направлении и 24 тыс. км³/год в южном).

В настоящее время для расчета потоков наносов широко применяются методы математического моделирования. Сезонная и годовая изменчивость направления и интенсивности вдольбереговых потоков наносов на участках береговой зоны Западного Крыма с применением ветроэнергетического метода детально изучены в работах [Удовик и Горячкин, 2013, 2015]. Отмечено существование на северном участке от г. Евпатория до пгт Николаевка двух потоков наносов, направленных друг к другу. В среднем за год поток южного направления имеет большую протяженность, однако в холодный период возможно формирование однонаправленного потока на север. В центральной части на участке пгт Николаевка – м. Лукулл преобладает поток северной направленности, незначительно ослабевающий в теплый сезон. Исследованию влияния течений, индуцируемых поверхностным волнением, на транспорт наносов и оценкам величин потоков этих наносов в районе побережья Евпатории и пгт Николаевка с применением результатов численного моделирования посвящены работы [Фомин и Иванов, 2005; Горячкин и Фомин, 2010; Харитонов и Фомин, 2011; Горячкин и др., 2013; Гуров и др., 2016].

1.3. Особенности гранулометрического состава донных наносов в прибрежных районах Крыма

Основоположники классификации донных отложений Черного моря Архангельский А.Д. и Страхов Н.М [Архангельский и Страхов, 1938] подразделяют их на три группы: 1) прибрежные (до глубины 30 м), 2) мелководные и 3) глубоководные отложения континентального склона. Прибрежные отложения представлены гравием и песками, а также скальными россыпями. Для прибрежных акваторий отмечается грубая слоистость. Здесь ил чередуется с ракушечным либо песчаным материалом. Мелководные отложения подразделяются на мидиевый ил, залегающий на глубинах до 60 м и фазеолиновый ил. Иногда в илах встречаются прослойки песка. Мидиевый ил отличается более грубым механическим составом и повышенным содержанием органического вещества [Архангельский и Страхов, 1938].

Согласно [Братусь, 1965а] песчаные наносы пляжей Крыма характеризуются незначительным содержанием пелитовой и алевритовой фракций, что также подтверждается материалами исследований Шуйского Ю.Д. [Шуйский, 2007], в которых указано, что фракции меньше 0,1 мм встречаются в береговой зоне в пределах первых процентов даже в условиях отмелого подводного склона.

В результате ситового анализа и после проведенной статистической обработки полученных результатов в работе [Братусь, 1965] показано, что средний медианный диаметр пляжевых наносов Крыма составил около 0,5 мм, при максимальном 1,7 мм и минимальном 0,19 мм. Если согласно исследованиям, проведенным в работе [Зенкович, 1962], характерным коэффициентом сортировки для пляжа считался 1,25, то по данным работы [Братусь, 1965] показано, что средний коэффициент сортировки пляжевых наносов составил 1,44 (подробно о расчете коэффициентов см. в пункте 3.2.2).

Выдвигались предположения, что состав наносов береговой зоны Каламитского залива обусловлен влиянием крупных крымских рек, таких Альма, Кача, Бельбек и в меньшей степени р. Черная [Шнюков и др., 2003] (Рисунок 1.1). С другой стороны, Шуйский Ю.Д. выделяет абразионные процессы и их роль в питании донных наносов залива материалом. Он считает поставку ракушечного материала в акваторию важным источником формирования донных наносов, объясняя это тем, что роль речных выносов ничтожна, поскольку у трех крупных рек (Альма, Кача, Бельбек) сток сильно зарегулирован, а другие водотоки временные и представляют собой сухоречья [Шуйский, 2007, Гуров и др., 2014].



Рисунок 1.1 – Схема исследуемых прибрежных районов Крыма

Согласно [Шнюков и др., 2003], в акватории Каламитского залива песчаная фракция наблюдается вплоть до изобат 30–50 метров. Границы распространения песчаных наносов совпадают с продолжениями впадин рек их выносящих, такая зависимость прослеживается до 10-метровой изобаты. Песчаную фракцию авторы подразделяли на среднезернистые пески (фракция 0,5–0,25 мм) составляющие до 60% проб и мелкозернистые (преобладала фракция 0,25–0,1 мм). Глубже 10-метровой изобаты преобладают алевроитовые илы, которые залегают однородным

слоем практически по всей территории залива. В большинстве проб преобладала фракция $<0,01$ мм, которая была представлена пелитовыми и алеврито-пелитовыми илами и в процентном отношении составляла 60–80% общей массы большинства проб [Тримонис, 1976].

Для акватории Евпаторийской бухты (Рисунок 1.1), как в целом для Каламитского залива зона распространения крупных песков незначительна. Отмечено [Зенкович, 1960], что полоса песков кончается уже в 50 метрах от уреза, однако в местах изолированных выходов коренных пород и в районе сразу за Карантинным мысом она расширяется.

Отсутствие галечного материала в пляжах Евпатории Зенкович В.П. [Зенкович, 1960] определяет невозможностью разгона вблизи города волн способных приводить в движение гальку. Отсутствие гальки в районе Евпатории объясняется наличием в северной части Сасыкской пересыпи значительного изгиба. Преодолевать такой изгиб и перемещать галечные наносы способны только ветра южной и юго-восточной направленности, но они в данном случае дуют с материка и не имеют достаточной силы. Кроме того, тот факт, что берег в районе Евпаторийской бухты не нарастает, говорит об ослаблении южного потока [Зенкович, 1958].

Согласно [Зенкович, 1960] пересыпь оз. Сасык сложена песком, ракушей, гравием и галькой. На урезе по мере продвижения на юг процентное содержание гравийно-галечной фракции возрастает. В работе [Шуйский, 2007] отмечено, что в наносах пляжей Сасыкской пересыпи преобладает фракция мелкозернистых песков (0,1–0,25 мм) составляющая до 45%, а содержание валунно-галечных фракций достигает 40% [Гуров, 2018]. В районе пересыпи встречается отдельный тип наносов – серый мелкозернистый кварцевый песок, ширина зоны распространения которого достигала 300 метров [Зенкович, 1960].

Пересыпь оз. Сакское имеет меньшую ширину, сложена крупнозернистыми песками с примесью гравия и гальки, а основным источником ее питания является вдольбереговой поток, направленный с юга [Зенкович, 1960]. Ранее, в работе

[Иванов, 2006] отмечалось, что механический состав пляжевых наносов Сакской пересыпи представлен мелкозернистыми песками.

Побережье остается неизменным до оз. Кизил-Яр (Рисунок 1.1). Состав материала наносов пересыпи галечный с прослоями песка [Зенкович, 1960]. В состав песков входит довольно много цельной и битой ракуши. Согласно данным [Шуйский, 2007], в материале Кизил-Ярской пересыпи преобладает фракция 0,25–0,5 мм, составляющая около 40%, также отмечено повышенное содержание гальки (до 39%).

По данным [Шуйский, 2007] в районе пгт Николаевка в гранулометрическом составе пляжевых наносов преобладают галечные фракции (до 35%), отмечено наличие крупнозернистых (1–0,5 мм) и среднезернистых песков (0,5–0,25 мм) – 15 и 21% соответственно [Гуров, 2018].

Согласно исследованиям, проведенным в работе [Шуйский, 2007], севернее р. Альмы (Рисунок 1.1) в наносах береговой зоны преобладают гравий и галька (фракция 7–10 мм – 36%), в сумме содержание гравийного материала достигает 95%. По данным [Зенкович, 1960] побережье на участке между устьем р. Альма и мысом Лукулл загромождено обрушенными глыбами и плитами, а наносы состоят практически полностью из гальки. Проведенные ранее исследования [Шуйский, 2007] показывают, что в районе м. Лукулл преобладает фракция среднезернистого гравия (около 26%). Общее содержание гравийно-галечных фракций достигает 85%, а песчаных – около 14% [Гуров, 2018].

Состав отложений в прибрежной части Южного берега Крыма очень разнообразен [Геология шельфа УССР..., 1985]. На западном участке мощность древнечерноморских отложений на глубине 50 м не превышает 20 см. Сами отложения представлены алеврито-пелитовыми илами, сменяющимися заиленными песками у берега. Терригенные бескарбонатные пески залегают узкой полосой вдоль всего побережья Южного берега Крыма от мыса Сарыч до мыса Меганом. Как правило, пески залегают на глубинах до 20–25 метров, в зоне

волнового воздействия. Песчаный материал отличается плохой реже средней сортировкой.

Дно акватории Лименского залива продолжает береговой крутой склон, образованный крупными глыбами [Зенкович, 1958]. За глыбами начинается ровное дно. Песчанистый грунт местами осложнен грядами, образованными крупной галькой и ракушкой различной крупности. Участки между грядами заполнены песком. Представленные морфологические особенности рельефа дна, отмеченные на глубине 18 м, по мнению автора, являются примерами ряби, созданной волновыми процессами. Напротив устья р. Лименка (Рисунок 1.1) валуны и глыбы выдвинуты далеко в море. В западной части залива галечный слой, распространяясь вдоль берега и огибая подножье глыбового навала, уходит далеко за пределы акватории. По мнению автора, представляется также интересным тот факт, что глыбы на морском дне глубиной 20 м в нескольких метрах от берега находятся не случайно. По мнению автора, это связано с отступанием берега [Зенкович, 1958].

Основными аллохтонными компонентами наносов в исследуемой акватории являются продукты абразии, эолового переноса, склонового стока. Автохтонными компонентами донных наносов являются продукты биогенного осаждения, а именно ракушечник и раковинный детрит, образовавшийся в результате волновой переработки. Исследование атмосферного аэрозоля на полигоне показало, что содержание обломочного кварца в донных наносах коррелирует с ветровой деятельностью – поставки увеличиваются при повышении скоростей ветра северных румбов [Наседкин, 2005, 2009; Овсяный и Гуров, 2016].

В работе [Лоция..., 1937] показано, что наносы Балаклавской бухты, представленные мелкодисперсной фракцией в верховье бухты, в центральной части сменяются илистыми песками, а в наиболее узкой части и на выходе из бухты – ракушечным детритом с вкраплениями сначала песка и мелкого гравийного материала, а затем ила [Гуров и др., 2015].

В настоящее время основными источниками материала для донных наносов являются сточные воды промышленных и коммунальных объектов, сброс

ливневых стоков, а также коммунальные сточные воды, которые сбрасываются в залив Мегало-Яло у м. Балаклавский. Оползневое происхождение западного берега, особенно в узкой области и в пределах южного бассейна, по-видимому, оказывает некоторое влияние на накопление крупнозернистого материала. Особенности рельефа дна, а именно увеличение глубины на выходе из бухты, способствует накоплению здесь мелкозернистых наносов.

Выводы к главе 1

Показано, что классифицировать донные отложения начали давно, но наиболее широкое распространение получил комплексный подход, основанный на анализе вещественного и гранулометрического состава наносов, а также условиях их образования, разработанный Архангельский Д.А. и Страховым Н.М. и дополненный Безруковым П.Л., Лисицыным А.П. и Рухиным Л.В. В основе комплексной классификации лежит механический состав наносов, определяемый такими физическими параметрами, как медианный диаметр частиц и коэффициент сортировки.

Основными факторами, определяющими формирование и динамику наносов в морских бассейнах, являются глубина и рельеф дна исследуемой акватории и прилегающей территории суши, гидрологический и гидродинамический режимы и поступление терригенного и биогенного материала.

Показано, что донные наносы прибрежных районов Крыма представлены в основном песчаными фракциями, чередующимися с ракушечным, либо илистым материалом.

Согласно литературным данным отмечено, что дифференциация материала наносов в зоне пляжа и в приурезовой полосе подводного берегового склона определяется местами расположения источников его поступления, характером размещения гидротехнических сооружений и направлением вдольберегового перемещения наносов.

Несмотря на большой интерес к изучению прибрежных районов Крыма, детальных исследований особенностей гранулометрического состава донных наносов и его динамики для исследуемых в работе акваторий Каламитского и Лименского заливов и Балаклавской бухты не проводилось. Сведения о структуре наносов, полученные ранее на отдельных точках в мористой и береговой зонах Каламитского залива, устарели, противоречивы и отрывочны, не отображают реальной картины и требуют обновления. Для акватории Лименского залива современные данные о полях распределения фракций донных наносов также отсутствуют. Имеющиеся данные для акватории Балаклавской бухты разрознены по годам, а описанию гранулометрического состава уделено мало внимания.

Отмечено, что, несмотря на особое значение, которое точные данные о размерном составе донных наносов имеют для адаптации и валидации моделей, описывающих литодинамические процессы на участках береговой зоны, детальных исследований штормовых и сезонных изменений гранулометрического состава донных наносов прибрежных районов Крыма в настоящее время не проводилось.

ГЛАВА 2 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Каламитский залив

2.1.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны. Каламитский залив является структурным элементом Западно-Крымской береговой области. Южной границей залива является мыс Лукулл, а северной – Евпаторийский мыс (Рисунок 2.1).

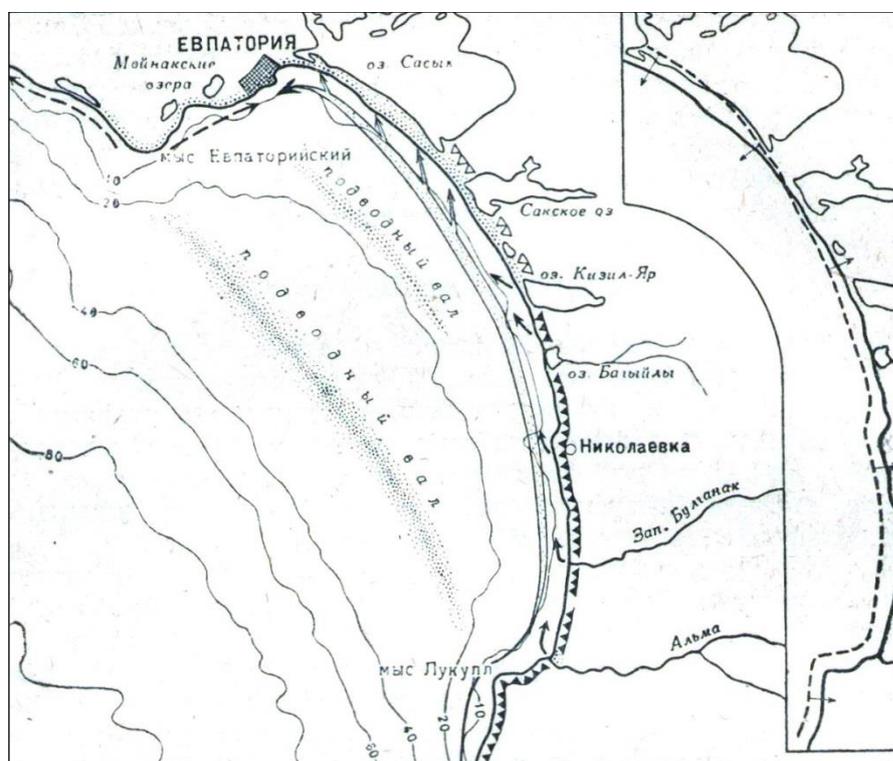


Рисунок 2.1 – Морфология и динамика берегов Каламитского залива [Зенкович, 1958]

Западно-Крымская область относится к северо-западной части Черного моря, лежащей в пределах окраины Скифской платформы. Этот район приурочен к тектоническому понижению. Берега района сложены породами подверженными абразионному воздействию, поэтому берег всего района хорошо выровнен. На севере в районе пересыпей озер Сасык и Сакское он является аккумулятивным, а затем выровненным и состоит из ряда аккумулятивных и абразионных участков.

Выравненность береговой линии нарушается несколькими мысами. Южная часть района до широты Кызыл-Ярской пересыпи представляет собой абразионную морскую террасу, выработанную в суглинисто-глинистых породах плиоцен-четвертичного возраста. Она перекрыта мощным слоем песка, либо, в отдельных местах обнажена [Иванов, 2006]. Каламитский залив отгорожен от моря подводными валами, сложенными из прочно сцементированных песчаников. Они защищают дно залива от действия волн и течений, поэтому илы здесь подходят близко к берегу [Зенкович, 1960].

На восток и юг от г. Евпатории берега сложены рыхлыми породами, а прибрежные участки понижены. Далее тянется полоса лиманов, а южнее берег абразионный, вырезанный в красновато-бурых структурных глинах. Выступ Евпаторийского мыса служит границей раздела двух аккумулятивных участков дна, а материал, который поступает сюда, следует далее вдоль берега, как на северо-восток, так и на северо-запад. В северо-западной части в акватории Каламитского залива выделяется Евпаторийская бухта [Зенкович, 1960]. За Евпаторией берег описывает широкую дугу и отклоняется на юго-восток и юг.

Пересыпь оз. Сасык является частью аккумулятивного тела, тянущегося от оз. Кизил-Яр до м. Карантинный в Евпатории. В 50-годах XX века пересыпь активно эксплуатировалась для добычи строительных материалов, что впоследствии привело к изменению профилей пляжей и сокращению их ширины. Согласно данным [Шуйский и др., 1982] в районе пос. Прибрежное было добыто около 1,5 млн. м³ песка. Далее на юг, пересыпь не меняет своей ширины и проходит вдоль края водораздельного пространства между озерами Сасык и Сакское.

На участке юг пересыпи оз. Кизил-Яр – пересыпь оз. Богайлы берег высокий абразионно-аккумулятивный с прислоненными пляжами и бенчем, состоящими из песчано-гравийного и валунно-галечного материала [Иванов, 2006]. Берег в районе пересыпи оз. Кизил-Яр на всем протяжении активно отступает. В работе [Шуйский и Выхованец, 2006] приводятся расчеты величин

отступления клифа в период с 1965 по 1990, согласно которым отмеченное отступление составляет в среднем около 1 м/год.

Пересыпь оз. Богайлы расположена в северном секторе абразионного участка берега Западного Крыма, простирающегося от г. Севастополь до южной границы оз. Кизил-Яр [Зенкович, 1960]. Длина пересыпи составляет около 1300 м, ширина 55–60 м, высота гребня над средним уровнем моря от 2 до 2,5 м. С морской части пересыпи рельеф пляжа и подводного склона достаточно однороден, изобаты расположены практически параллельно береговой черте. Ширина зоны наиболее активной волновой переработки пляжевого материала составляет от 35 до 40 м и отчетливо выделяется по границе растительного покрова. Поверхность гребня осложнена остаточными понижениями рельефа на 40–60 см в местах перелива морской воды через вершину берегового вала во время сильных штормов, сопровождающихся нагонными явлениями. С севера и юга к пересыпи примыкают участки коренного берега, представленные активно разрушающимися клифами высотой 10–12 м. Существующие здесь прислоненные пляжи неполного профиля имеют ширину до 12–15 м, что явно недостаточно для защиты клифов от волновой абразии. В результате, клифы, а вместе с ними и береговая линия, на данном участке побережья активно отступают. На основе данных мониторинговых исследований МГИ РАН и результатов, полученных в работах [Шуйский и Выхованец, 2006; Современное состояние береговой зоны Крыма, 2015], в качестве наиболее достоверной оценки средней скорости отступления берега в районе оз. Богайлы можно принимать величину 0,5–1 м/год. Клифы сложены преимущественно бурыми глинами, и содержат незначительное количество (от 2 до 16%) частиц песчаной и более крупных фракций, которые могут осуществлять подпитку местных пляжей при разрушении береговых обрывов [Зенкович, 1960; Шуйский, 2007]. Недостаточное поступление материала из местных источников приводит к тому, что основное питание аккумулятивных форм рельефа на данном участке береговой зоны происходит в результате вдольберегового перемещения наносов средним потоком, направленным с юга на север. С точки зрения теории формирования среднего потока, представляющего

собой сумму единичных штормовых подвижек и миграций обломочного материала за длительный период времени, данный участок побережья можно отнести к зоне транзита наносов в рамках литодинамической системы Каламитского залива [Зенкович, 1960; Шуйский и Выхованец, 2006; Удовик и Горячкин, 2013; 2015]. Таким образом, основные изменения рельефа береговой зоны на данном участке побережья могут происходить преимущественно под воздействием штормовых волн, имеющих направление, близкое к нормали по отношению к береговой линии [Гуров и др., 2019].

У пгт Николаевка берег делает резкий поворот на запад, образуя выступ, что обусловлено выходом четвертичных конгломератов у подножья клифа, затем берег опять поворачивает на юг. Отсюда на 5 км протянулась рекреационная зона пгт Николаевка – одна из самых проблемных территорий Крымского побережья. Многолетняя безуспешная борьба с наступающим морем не приводит к положительным результатам [Современное состояние береговой зоны Крыма, 2015]. В 90-х годах прошлого века в южной части пгт Николаевка берег был террасирован и закреплен откосно-ступенчатыми набережными, которые со временем сильно разрушились. На побережье в районе пгт Николаевка в основании клифа повсеместно отмечаются выходы конгломератов. Во время штормов они размываются и подпитывают пляжи галькой, гравием и песком. Укрепление берегов лишает пляжи источника пополнения. Это неизбежно приводит к отступанию береговой линии и усилению абразии. Отсутствие пляжа приводит к тому, что под воздействием волн любого направления, помимо усиления динамических волновых нагрузок, происходят подмыв и подсечка бетонных конструкций ступеней. В свою очередь, потеря целостности конструкции в одном месте вызывает быстрое разрушение примыкающих участков [Современное состояние береговой зоны Крыма, 2015].

Южнее долины р. Альма мощность гальки становится особенно большой. Слои конгломерата достигают толщины до 1 м и вместе с линзами песка залегают на нескольких горизонтах. Между ними и под ними залегают структурные бурые глины. Подножье берегового уступа между устьем р. Альма и м. Лукулл

загромождено обвалившимися с обрыва плитами и глыбами, а береговые наносы состоят уже преимущественно из гальки [Зенкович, 1960].

Рельеф пляжа и подводного склона на участках береговой зоны Каламитского залива достаточно однороден, изобаты расположены практически параллельно береговой черте. Основным источником питания аккумулятивных форм рельефа залива является вдольбереговой поток наносов. Однородность рельефа дна подводного берегового склона и особенности экспозиции берега в пределах исследуемых участков Каламитского залива, а также распределение наносов во вдольбереговом направлении позволят в дальнейшем в настоящей работе для моделирования динамики гранулометрического состава реализовать 1D вариант модели. Для изучения динамики донных наносов в настоящей работе выбраны наиболее характерные участки подводного берегового склона и аккумулятивно-отступающих пляжей пересыпи оз. Сасык и северного участка пересыпи оз. Богайлы, а также антропогенный тип берега на участке пгт Николаевка.

2.1.2 Гидрометеорологические условия района. Динамика вод в прибрежной зоне Каламитского залива согласно исследованиям [Горячкин, 2009] в значительной степени определяется поверхностным волнением, которое вызывает аккумулятивно-абразионные процессы, приводящие к размыву пляжей и переформированию прибрежных участков дна.

Акватория Каламитского залива открыта для ветров всех направлений. Роза ветров зимой, осенью, а также весной характеризуется северо-восточными ветрами, а летом – юго-западными ветрами и морскими бризами. Таким образом, наибольшая повторяемость в районе г. Евпатория отмечена для ветра северной, восточной, северо-восточной, южной и юго-западной направленностей [Репетин и Белокопытов, 2009, Горячкин и Репетин, 2009]

Анализ среднемесячных значений скорости ветра, представленный в работе [Репетин и Белокопытов, 2009], показал, что наименьшие значения (3,6–3,8 м/с)

приходятся на летний период с июня по сентябрь, а наибольшие (5,1–5,6 м/с) отмечены в периоды с ноября по декабрь и с января по март [Гуров, 2020].

Согласно данным, полученным с морской гидрометеорологической станции в г. Евпатория в период с 1945 по 2008 гг., наибольшая повторяемость ветрового волнения была отмечена для южного и юго-западного направлений (Рисунок 2.2, б) [Горячкин и Репетин, 2009].

Анализ статистических характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне Каламитского залива, полученных по данным ретроспективных расчетов за период с 1979 по 2010 гг., для района Евпатории представлен в работе [Харитонов и Фомин, 2012]. В работе представлено сравнение значений повторяемости волнения по данным ре-анализа и натурным наблюдениям (Рисунок 2.2, а, в). Показано, что данные по направлению волнения, полученные с морской гидрометеорологической станции [Репетин и Белокопытов, 2009] и по ре-анализу хорошо сопоставимы по порядку величин и по форме розы волнения. Полученные данные модельных расчетов подробно отображают повторяемость волнения для основных волноопасных направлений. Внутригодовое распределение величин повторяемости ветрового волнения хорошо соотносится с данными среднемесячных величин скоростей ветра, полученных в работе [Репетин и Белокопытов, 2009]. Наибольшая интенсивность ветрового волнения отмечается в период с октября по март, минимальная – с мая по сентябрь.

В работе [Gurov et al., 2019] представлены результаты расчетов повторяемости интенсивных волн в акватории Каламитского залива, полученные с помощью модели SWAN с использованием промежуточных полей приземного ветра ERA за период 1979–2017 гг. Выявлено, что в районе исследований наиболее интенсивные ветровые волны подходят к берегу по нормали (с юго-запада) (Рисунок 2.2, г)

Анализ величин основных параметров ветрового волнения основан на результатах, представленных в работах [Атлас волнения и ветра..., 1969; Типовые поля ветра и волнения..., 1987; Ефимов и Комаровская, 2009]

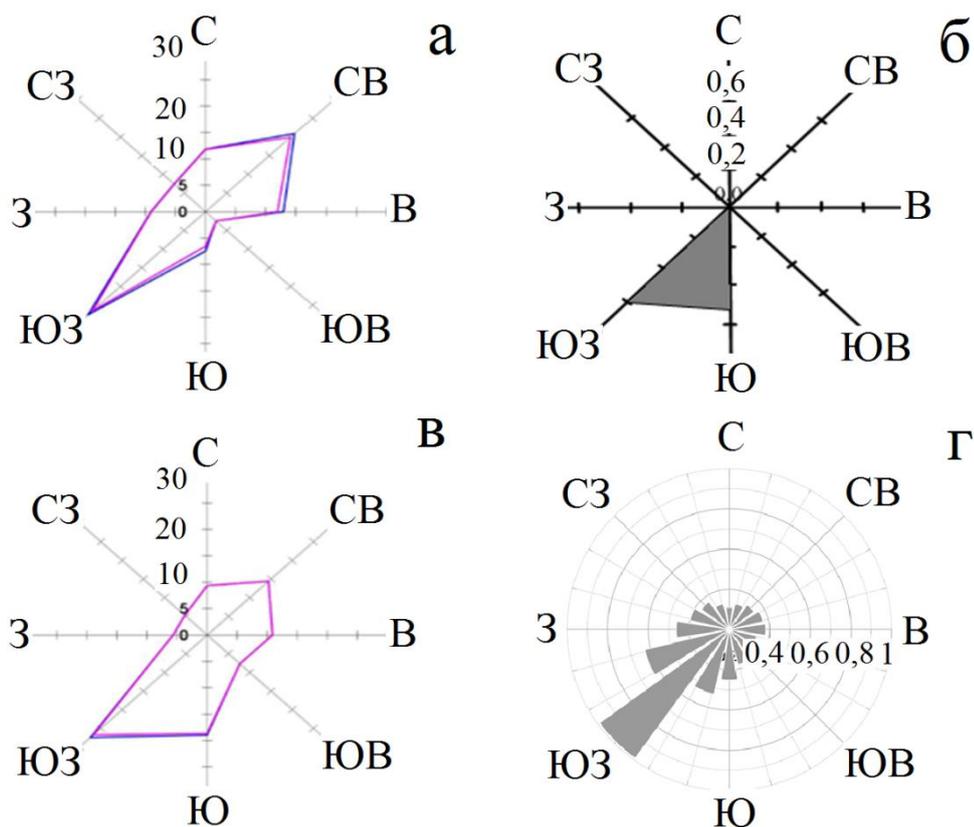


Рисунок 2.2 – Розы повторяемости ветрового волнения (%) по МГ в Евпатории (а) и данным ре-анализа (1958–1997 гг.) (б); (1979–2010 гг.) (в) и (1979–2019 гг.) (г) [Горячкин и Репетин, 2009; Харитоновна и Фомин, 2012, Gurov et al., 2019]

В работе [Типовые поля ветра и волнения..., 1987] показано, что для акватории Каламитского залива средние высоты волн достигают 2 м и более при юго-западном и западном ветрах. Средняя годовая суммарная повторяемость высот волн, превышающих 1 м, для Каламитского залива составляет 55%, для волн, превышающих 3 м, она составляет 6–8%, а больше 5 м – находится в пределах 0,5%. Ниже представлены некоторые статистические характеристики ветрового волнения, рассмотренные для наиболее волноопасных направлений ветра: юго-западного и западного.

Результаты, полученные в работе [Атлас волнения и ветра..., 1969] для юго-западного направления ветра, показали, что наибольшие высоты волн обеспеченностью 5% в зависимости от интенсивности ветрового воздействия изменяются от 1,4 м при ветре 5–10 м/с до 3–3,5 м при ветре 15–20 м/с. Значения среднего периода волны изменяются от 4 с до 6,5 с, соответственно. В результате

интенсивного штормового воздействия (> 20 м/с) возможно формирование волны с высотой 5 м и периодом 7 с. Для западного ветра соответствующие значения изменяются от 1,4 м при ветре 5–10 м/с до 5 м при ветре 15–20 м/с, а для штормового западного ветра достигают 7,5 м и 9 с.

В работе [Ефимов и Комаровская, 2009] показано, что для Каламитского залива раз в 10 лет наблюдаются волны с высотой 4,25–4,5 м и периодом 9 с, раз в 50 лет с высотой 5–5,25 м и периодом 10 с и раз в 100 лет с высотой 5,5–5,75 м и периодом 10 с.

Основываясь на том, что основным фактором, определяющим формирование и эволюцию гранулометрического состава донных наносов Каламитского залива, является ветровое волнение, в ходе исследования особенностей перераспределения гранулометрических фракций по профилю подводного берегового склона особое внимание будет уделено именно штормовым условиям.

В результате анализа имеющихся литературных данных были сформированы массивы данных параметров ветрового волнения, в дальнейшем используемые для моделирования динамики донных наносов. Используемые характеристики выбраны исходя из средних величин, характерных для данной акватории, величин, для которых отмечена максимальная повторяемость и величин наблюдаемых раз в 50–100 лет.

Юго-западное и западное волнение, отмеченное как наиболее волноопасное, имеет направление, близкое к нормали по отношению к береговой линии, что позволит использовать для математических расчетов 1D вариант модели [Гуров и Фомин, 2021a].

2.2 Лименский залив

2.2.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны. Береговая зона в районе полигона сложена породами Таврической серии. Лименский залив ограничен с востока отрогами горы Кошка, с запада –

м. Кикинеиз. Залив вытянут в широтном направлении, и отличается высокими берегами. Западный берег сложен толщей отложений глин и суглинков с включением обломочного материала юрских известняков, часто размерами в несколько метров. Центральная часть берега характеризуется активной абразией и эпизодическими обрушениями берега, сложенного песчано-глинистыми наносами [Шнюков и др., 1984]. Скальные берега восточной части состоят из глыб верхнеюрского известняка [Шестопалов, 2005]. В восточной части в залив впадает р. Лименка – временный водоток с сезонно-паводочным режимом [Овсяный и Гуров, 2016].

Район Лименского залива относится к тектонической структуре Антиклинория западной части Южного берега Крыма [Геология СССР..., 1969]. В целом весь Южный берег Крыма от пос. Морское на востоке до Батилимана на западе имеет схожее строение. Узкая прибрежная полоса сложена глинистыми и песчаными отложениями Таврической серии и средней юры. Она прорезана многочисленными оврагами и балками. С севера ее ограничивают очень крутые и часто обрывистые склоны Главной гряды, сложенные карбонатными породами верхней юры.

На Южном берегу, в районах, где дно сложено крупным перемещаемым материалом, уклоны в первые десять метров составляют 0,04–0,06. Глыбовые навалы падают с уклоном 0,08–0,1. В местах развития пород Таврической серии и наличия абразионной террасы уклоны уменьшаются до 0,03–0,04 [Зенкович, 1958].

Согласно работам [Наседкин, 2005, 2009], в исследуемом районе существует два основных источника поступления вещества в донные наносы – привнесение минеральной составляющей с побережья вследствие ветровой эрозии, плоскостного смыва и абразии берега, а также продуцирование в море живыми организмами. Минералогический анализ взвешенного вещества показал, что второй источник имеет подчиненное значение.

Отличительные особенности орографии берега, приглубый рельеф в прибрежной зоне, значительные уклоны дна в береговой зоне – одни из основных

факторов, влияющих на динамику донных наносов. Влияние этих параметров на формирование гранулометрического состава будет в дальнейшем исследовано с помощью методов математического моделирования.

2.2.2 Гидрометеорологические условия района. Погодные условия на участке Южного берега Крыма (ЮБК) определяются синоптическими процессами, проходящими над Крымским полуостровом и Черным морем, а также особенностями горного рельефа данного региона [Зац, 1966]. Для ЮБК наиболее высока повторяемость штормового волнения восточного и юго-восточного направлений (Рисунок 2.3) [Горячкин и Репетин, 2009].

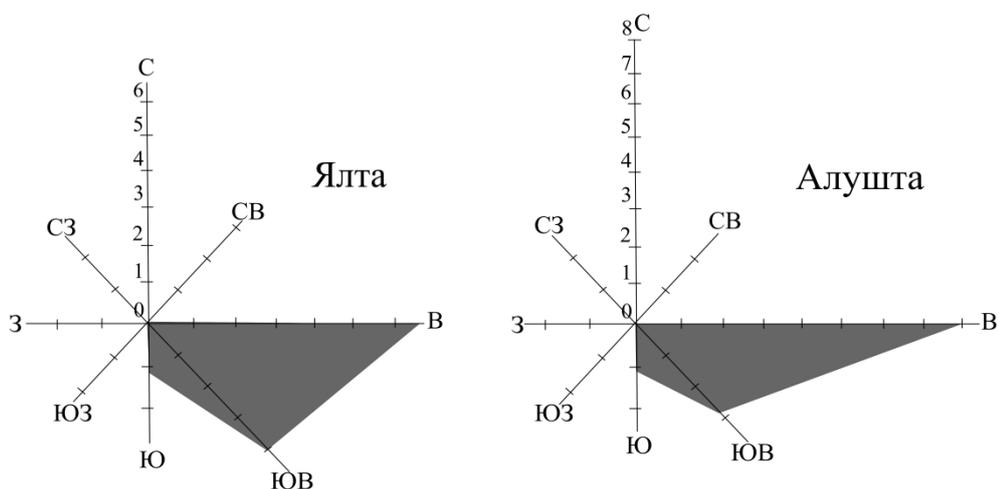


Рисунок 2.3 – Среднегодовалые розы штормового волнения (%) на участках ЮБК по данным береговых станций за 1945–2008 гг. [Горячкин и Репетин, 2009]

В работе [Блатов и Иванов, 1992] отмечено, что теплая половина года (с апреля по октябрь) характеризуется слабыми ветрами, частыми штилями и развитой бризовой циркуляцией. Весной в районе ЮБК увеличивается повторяемость ветров с моря (восточных и южных). Тем не менее, для района ЮБК в целом и, в частности, для Лименского залива штормовые ветра южной направленности, почти не наблюдаются [Зац, 1966; Потапова, 1959]. Наибольшую повторяемость имеют кратковременные штормы продолжительностью до 12 ч и максимальными скоростями ветра 12–18 м/с [Зац, 1966]. В холодные месяцы года

в этом районе преобладают ветра, направленные вдоль берега (северо-восточные, западные, юго-западные). В пгт Кацевели повторяемость северо-западных ветров достигает 60%. Кроме этого, на холодную часть года приходится около 80% всех штормов [Митропольский и др., 2005; Наседкин и др., 2009].

В районе Лименского залива преобладающим является направление течения с востока на запад, что обуславливается общей циркуляцией вод Черного моря. Западное вдольбереговое течение (средний азимут 247°) имеет скорости 20–30 см/с. Однако для различных синоптических периодов скорости могут достигать 70–80 см/с и до 100 см/с. Волнение северных и западных румбов хоть и вызывается сильными ветрами этих направлений, но из-за орографии берега высота волн не превышает 0,5 м [Куклин, 2003].

Анализ величин основных параметров ветрового волнения основан на результатах, представленных в работах [Атлас волнения и ветра..., 1969; Типовые поля ветра и волнения..., 1987; Ефимов и Комаровская, 2009; Мониторинг прибрежной зоны..., 2014].

В работе [Атлас волнения и ветра..., 1969] отмечено, что для акватории Лименского залива отмечаются следующие максимальные средние высоты волн: раз в год – 3,4 м, раз в 5 лет – 4–5 м, раз в 10 лет – 5 м и раз в 20 и 50 лет – 6 м. Средняя годовая суммарная повторяемость высот волн, превышающих 1 м для Лименского залива – 55%, превышающих 3 м – 7%, 5 м – 0,75% [Типовые поля ветра и волнения..., 1987].

Современные расчеты статистических характеристик ветровых волн приведены в работе [Мониторинг прибрежной зоны..., 2014]. Представленные оценки высот волн обеспеченностью 13% показали, что раз в год для акватории Лименского залива характерны волны с $H=3,6$ м, раз в 5 лет – 4,5 м, раз в 10 лет – 5,0 м. Показано, что для штормовых условий пиковый период волн может составлять 12 с. Отмечено, что максимальной повторяемостью характеризуются волны вдольбереговых направлений, а определяющий вклад в формирование пространственной структуры ветрового волнения вносят неоднородности рельефа и генеральное направление ветра.

В работе [Гармашов и др., 2016] показано, что летом отмечаются наименьшие средние высоты волн (0,2–0,28 м), а максимальные значения достигают 1,8 м. В осенний период максимальные значения возрастают в 1,5 раза, достигая 5,6 м. Для лета характерно слабое волнение (до 0,5 м). Легкое (0,5–1,25 м) и умеренное (1,25–2,5 м) волнение отмечаются преимущественно в осенние месяцы. Режим и экстремальные характеристики ветра, полученные в результате анализа более чем 85000 часовых записей метеорологических параметров на океанографической платформе в течение 2011–2018 годов, показаны в работах [Garmashov et al., 2018, Garmashov and Toloknov, 2019].

Представленные выше статистические характеристики будут в дальнейшем использованы в качестве начальных условий для волнения в модели *XBeach*. Все расчеты будут проводиться для штормового периода в 12 часов. Исходя из полученных характеристик, значительная высота волны h_s будет установлена равной 3,6 м (характерно для исследуемой акватории раз в год), 4,5 м (раз в 5 лет) и 5 м (раз в 10 лет). Пиковый период волны $\tau_p = 12$ с. Выбор направлений волнения на мористой границе основан на том, что юго-юго-западный, южный и юго-юго-восточный румбы штормового волнения являются для акватории Лименского залива наиболее разрушительными.

2.3 Балаклавская бухта

2.3.1 Геолого-геоморфологическое строение прибрежной и береговой зоны. Балаклавская бухта расположена на юго-западном берегу Крыма между мысами Фиолент и Айя. Акватория бухты, исходя из морфометрии дна и конфигурации берегов, разделяется на мелководную часть в вершине бухты, центральную часть, южное глубоководное расширение и коленообразную узость, соединяющую две последние части [Ломакин и Попов, 2011].

Согласно [Геология СССР..., 1969] район залива Мегало-Яло и входящая в него Балаклавская бухта относятся к тектонической структуре мегантиклинория горного Крыма. Балаклавская бухта представляет собой характерный

ингрессионный залив риасового типа. В работе [Зенкович, 1958] Зенкович даже говорит, что по своему строению она напоминает норвежские фьорды. По обоим берегам вершины Балаклавской бухты у подножья гор имеются пологие склоны. Устье бухты составляет около 200 м в ширину и расположено между крутыми, обрывающимися в воду скалами. Глубина в устье достигает 36 метров. Общая длина составляет более 1,5 км при почти постоянной ширине.

Бухта имеет S-образную конфигурацию: в центральной части коленовидная узость разделяет бухту на две примерно равные по площади акватории – северный и южный бассейны, которые отличаются особенностями морфометрии и гидродинамики [Ломакин и Попов, 2011].

В работе [Ломакин и Попов, 2011] показаны некоторые современные морфометрические характеристики бухты: глубина на входном створе (34,2 м), длина по фарватеру (1410 м), ширина на входном створе (200 м), наименьшая ширина (95 м), длина береговой линии (3,33 км) и средняя глубина (12,5 м). Показано, что 47% площади акватории расположено над глубинами 4–12 м. Батиметрия и орография бухты существенно изменились в период с конца XIX до начала XXI в. Наибольшие изменения коснулись северной мелководной части, где в результате дноуглубительных работ ее глубина с 1,83 м увеличилась до 4–5 м [Гуров и др., 2015, Гуров и Фомин, 2021]. Первоначально береговая линия бухты имела плавное округлое очертание и, по мнению [Ломакин и Попов, 2011], была заболочена. Западный берег центральной части и узкой области был сильно изрезан и осложнен скоплениями отдельных камней, имеющих оползневое происхождение. В центральной части в месте впадения реки находился небольшой пляж. Анализ промеров 1944 года [Ломакин и Попов, 2011] показал значительные изменения в очертании береговой линии и батиметрии бухты, а береговая линия кутовой части приобрела прямоугольные очертания. Современные исследования, проведенные в 2004 г., показали, что глубина мелководной и центральной частей сильнее увеличилась, берег кутовой части сильнее выровнялся, а глубина на входном створе практически не изменилась [Попов, 2006].

Особенности очертания береговой линии Балаклавской бухты, а именно ее замкнутость и изолированность от открытой части залива Мегало-Яло – основной фактор, определяющий как гидродинамику вод в бухте, так и динамику донных наносов. Берег на выходе из бухты абразионно-обвальный, сильно изрезан и осложнен скоплениями отдельных камней. Разрушение пород слагающих береговую зону является источником поступления терригенного материала в донные наносы. Влияние представленных физико-географических характеристик бухты на особенности ее гидрологического режима будет исследовано в дальнейшем в рамках изучения динамики гранулометрического состава донных наносов с помощью методов математического моделирования.

2.3.2 Гидрометеорологические условия района. Для района Балаклавы значительная средняя многолетняя скорость ветра достигает 6 м/с. Максимальная скорость ветра и интенсивность волнения отмечаются в холодное время года. Преобладают ветры южного (31%), северного (29%) и северо-восточного (22%) направлений (Рисунок 2.4, а). Роза ветров соответствует горно-долинному типу [Репетин, 2003]. Согласно [Зац, 1972] направление ветра в бухте всегда совпадает с осевой линией. Наибольшая повторяемость сильных ветров зафиксирована от южных и северных направлений. Центральная и северная кутовые части отличаются своей изолированностью от ветрового воздействия. Шторма характерны только для южной, открытой и глубоководной части при сильных южных ветрах. По наблюдениям [Репетин, 2003] в Балаклаве максимальная повторяемость волнения, в том числе штормового, отмечена от направлений со стороны моря: южного (около 30%), юго-западного (17,2%) и юго-восточного (10,7%) (Рисунок 2.4, б).

В осенний период, во время прохождения средиземноморских циклонов, ветра южных румбов способны достигать 30 м/с и формировать волны высотой до 7 м [Кириянов, 1968; Репетин, 2003]. Определенные по экстраполированным областям кривых режимной обеспеченности величины высот волн, возможные в Балаклавской бухте один раз в n лет, показаны в Таблице 2.1

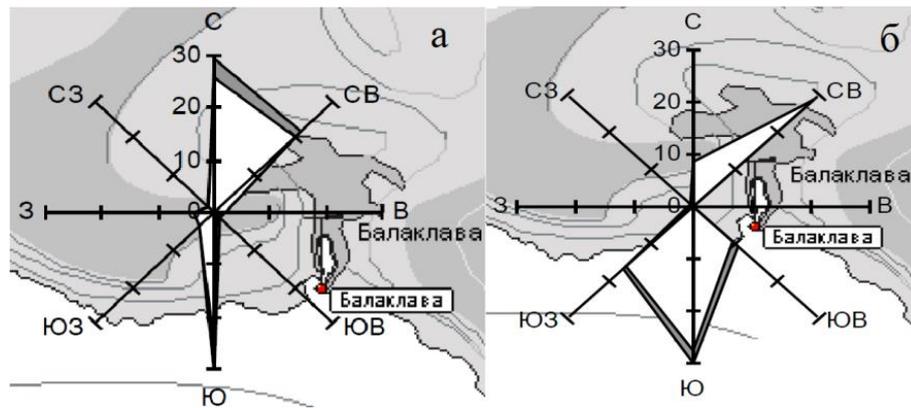


Рисунок 2.4 – Годовые розы повторяемости (%) а) ветра и б) ветрового волнения по данным с МГ в Балаклаве за период 1951–1964 гг. [Репетин, 2003]

Таблица 2.1 – Высота волн возможная на взморье Балаклавской бухты один раз в n лет [Репетин, 2003]

Временной интервал	год	5 лет	10 лет	25 лет	50 лет
Режимная обеспеченность, %	1,4	0,27	0,14	0,054	0,027
Высота волны, м	3,5	4,4	5,3	5,8	7,0

Структура поверхностных течений, описанная в работе [Ломакин и Попов, 2013], представлена тремя вариантами. Под воздействием северных ветров возникает течение южного направления, усиливающееся в узкой части бухты за счет туннельного эффекта. При ветрах южного направления формируются северные векторы течений, скорость которых возрастает в северо-восточной части акватории. При слабом влиянии восточных и западных ветров, а также в штилевую погоду действуют вихревые образования циклонической и антициклонической направленности [Гуров и др., 2015].

Структура придонных течений, описанная в работе [Кубряков и Попов, 2005], показала, что придонная циркуляция выражена слабо. Направление придонных течений противоположно по отношению к поверхностным. Формирующийся поток начинается в кутовой части и распространяется вдоль

западного берега в южном направлении [Гуров и др., 2015]. В статье [Фомин и Репетин, 2005] аналогичная задача решалась для трех основных направлений ветра (северного, северо-восточного и южного) скоростью 10–15 м/с. В работе отмечено, что наличие локальных вихревых структур в поле течений может приводить к возникновению областей концентраций наносов на границе между центральной и северной частью бухты.

В работе [Фомин и Полозок, 2020] для расчета параметров волнения применялась спектральная волновая модель SWAN (swanmodel.sourceforge.net). В качестве входных данных модели использовались поля приземного ветра ERA Interim за 1979–2017 гг. [Divinsky et al., 2020]. В результате расчетов по модели SWAN получен массив параметров ветровых волн для всего Черного моря длиной 39 лет на неструктурированной расчетной сетке с дискретностью по времени 1 ч. Анализ полученных результатов показал, что в более чем 50% случаев высота значительных волн $h_s \leq 0,5$ м, волны высотой $h_s = 1$ м возникают в 10% случаев, а повторяемость волн высотой $h_s \geq 2,5$ м составляет $\sim 1\%$. Максимальную повторяемость ($\sim 40\%$) имеют волны юго-западного и юго-юго-западного направлений. Самые высокие волны подходят к бухте с юго-юго-запада (Рисунок 2.5). Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабрь-январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в августе.

Для исследования динамики донных наносов в Балаклавской бухте и прилегающей части залива Мегало-Яло применялся двухмерный вариант модели *XBeach* с постоянным шагом сетки 10 м. Характеристики ветрового волнения задавались с помощью спектра *JONSWAP* с фиксированной высотой, периодом волны и различными комбинациями направления волнения (ЮЮВ, Ю и ЮЮЗ). Расчеты осуществлялись для штормового события продолжительностью 12 часов, что удовлетворяет средним многолетним значениям длительности штормов, полученным в работе [Фомин и Полозок, 2020]. Используемая в модели *XBeach* высота значительных волн составляла 5 м. Это примерно соответствует высоте волн 13% обеспеченности возможной 1 раз в год (Таблица 2.2). Пиковый период волны $\tau_p = 10$ с удовлетворяет величинам, представленным в работе [Фомин и

Полозок, 2020]. Для остальных параметров применялись настройки по умолчанию.

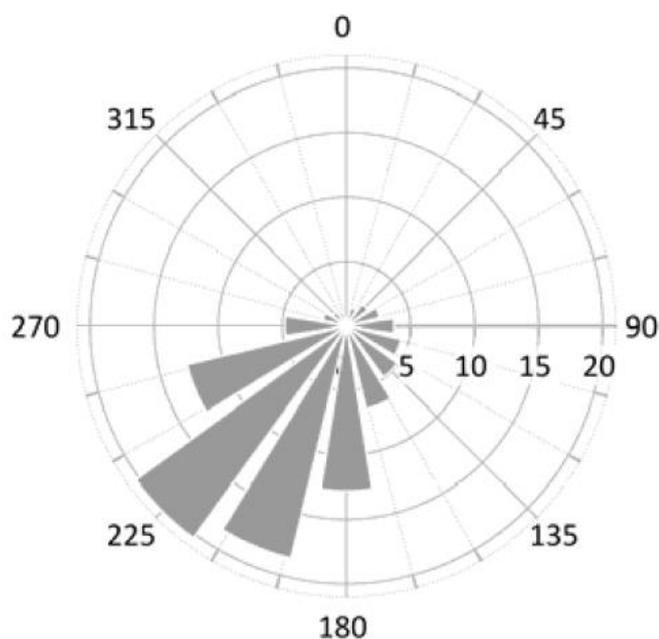


Рисунок 2.5 – Повторяемость среднего направления волнения (%) по данным SWAN-ERA [Фомин и Полозок, 2020]

Таблица 2.2 – Средняя высота волн \bar{h} и высоты волн 50%, 13%, 3% и 1%, обеспеченности (м), возможные 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет на взморье Балаклавы по данным SWAN-ERA [Фомин и Полозок, 2020]

Т, годы	\bar{h}	$h_{50\%}$	$h_{13\%}$	$h_{3\%}$	$h_{1\%}$
1	3	2,9	4,7	5,9	6,6
5	3,7	3,6	5,7	7,1	8
10	4,1	4	6,2	7,7	8,6
25	4,5	4,4	6,8	8,5	9,4
50	4,8	4,7	7,3	9	10
100	5,2	5,1	7,7	9,5	10,6

Выводы к главе 2

Во второй главе приведен анализ литературных данных, описывающих особенности геолого-геоморфологического строения прибрежной и береговой зон, гидрометеорологические и гидродинамические условия как основные факторы формирования донных наносов в акваториях Каламитского залива Лименского залива и Балаклавской бухты.

Отмечено, что недостаточное поступление материала в связи с зарегулированностью рек Западного Крыма, нерациональное строительство в береговой зоне, добыча песка на участках пересыпей и в прибрежной зоне привели к нарушению вдольберегового потока и, как следствие, к негативным геодинамическим процессам в береговой зоне Каламитского залива. Отмечено, что динамика вод в прибрежной зоне Каламитского залива в значительной степени определяется поверхностным волнением, а основное перераспределение донных наносов в данном районе происходит преимущественно под воздействием штормовых волн, имеющих направление, близкое к нормали по отношению к береговой линии.

Лименский залив вытянут в широтном направлении, и отличается высокими берегами. Западный берег сложен толщей отложений глин и суглинков с включением обломочного материала юрских известняков, часто размерами в несколько метров. Центральная часть берега характеризуется активной абразией и эпизодическими обрушениями берега, сложенного песчано-глинистыми наносами. Анализ литературных источников показал, что наибольшую повторяемость для акватории Лименского залива имеют кратковременные шторма продолжительностью до 12 ч. Приведенные оценки высот волн обеспеченностью 13% показали, что раз в год для акватории Лименского залива характерны волны с $H = 3,6$ м, раз в 5 лет – 4,5 м, раз в 10 лет – 5,0 м. Показано, что для штормовых условий пиковый период волн может составлять 12 с.

Балаклавская бухта представляет собой характерный ингрессионный залив риасового типа. Центральная и северная кутовые части бухты отличаются своей

изолированностью от ветрового воздействия. Шторма характерны только для южной, открытой и глубоководной части при сильных южных ветрах. По данным литературных источников, максимальная повторяемость волнения в Балаклавской бухте, в том числе штормового, отмечена от направлений со стороны моря: южного (около 30%), юго-западного (17,2%) и юго-восточного (10,7%).

Основываясь на том, что основным фактором, определяющим формирование и эволюцию гранулометрического состава донных наносов в исследуемых акваториях шельфа Крыма, является ветровое волнение, в ходе исследования особенностей перераспределения гранулометрических фракций по профилю подводного берегового склона особое внимание будет уделено именно этому фактору.

Описанные физико-географические и геоморфологические особенности выбранных районов, а также гидрометеорологические характеристики, определяющие динамику вод в исследуемых акваториях, будут использованы в качестве граничных и начальных условий при моделировании динамики гранулометрического состава донных наносов.

Результаты исследований, представленные во второй главе работы, опубликованы в [Гуров и др., 2015; Овсяный и Гуров, 2016; Гуров и др., 2019; Gurov et al., 2019; Гуров, 2020; Гуров и Фомин, 2021, 2021a].

ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ И ЕГО ДИНАМИКИ

3.1 Материал исследований

Отбор донных наносов проводился в соответствии с требованиями нормативных документов и межгосударственного стандарта [ГОСТ..., 1984; ISO..., 2004]. Способы отбора проб донных наносов выбирались в зависимости от характера и свойств донных наносов и целей исследования. Отбор проб поверхностного слоя донных наносов, используемых для анализа в данной работе, осуществлялся с помощью дночерпателя Петерсона или ДЧ-0,025 (площадь охвата 0,025 м²).

Для анализа особенностей пространственного распределения гранулометрического состава донных наносов Каламитского залива пробы были отобраны в рамках научно-исследовательских работ Морского гидрофизического института НАН Украины в августе 2011 г. на НИС «Профессор Водяницкий» [Шнюков и др., 2011] (мористая часть) и в сентябре 2012 г. на НИС «Риони» (прибрежная часть). Отбор проб в рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в августе 2011 г. проводился в основном в мористой части залива, и этим обусловлено повышенное содержание мелкодисперсных фракций. Пробы, полученные в сентябре 2012 г., отбирались вблизи берега, что также сказалось на их гранулометрическом составе. Всего было отобрано 10 проб в мористой и 5 проб в прибрежных частях залива. В 2011 и 2012 гг. пробы были отобраны без участия автора, в дальнейшем автор принимал непосредственное участие в анализе проб. Расположение станций отбора проб представлено на Рисунке 3.1.

В связи с тем, что фракционный состав донного материала на прибрежных станциях разнообразен, полученные значения были дополнены результатами гранулометрического анализа проб в береговой зоне.

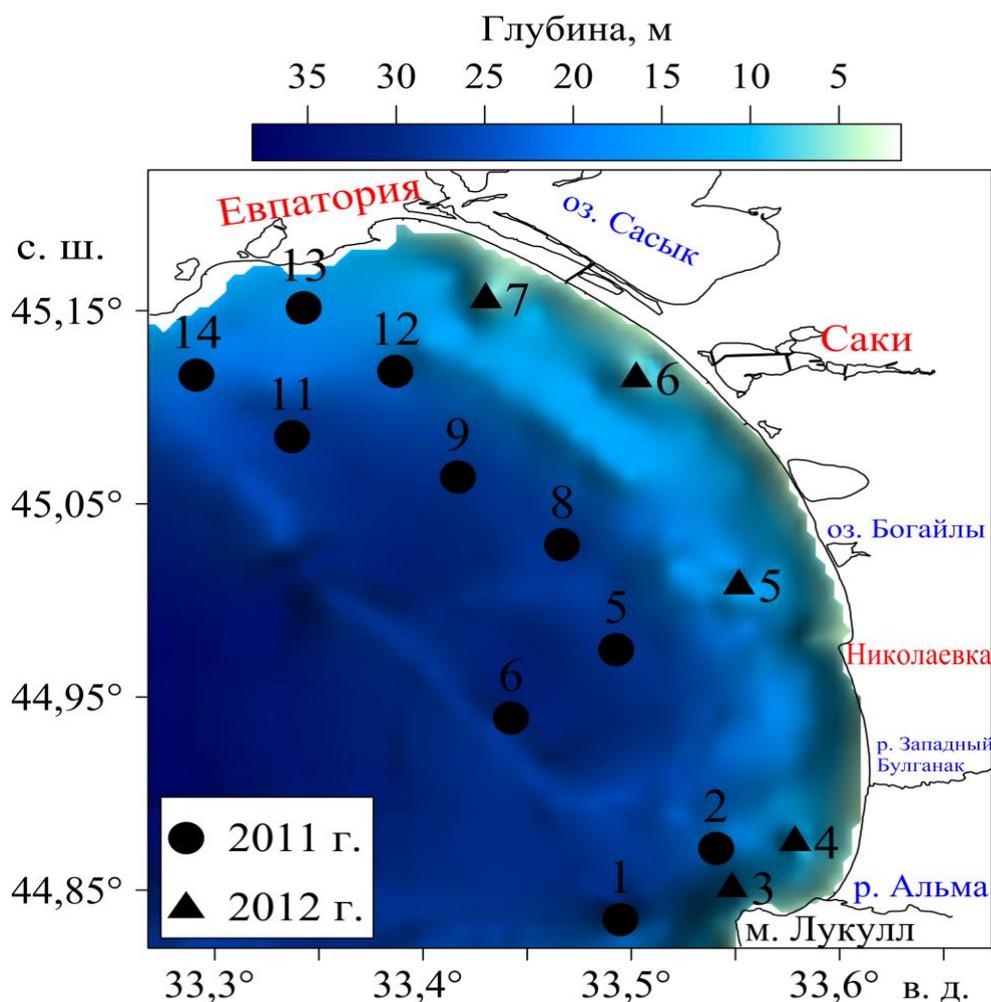


Рисунок 3.1 – Станции отбора проб донных обложений (● – 69-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», август 2011 г.; ▲ – НИС «Риони», сентябрь 2012 г.)

Сбор материалов натуральных наблюдений осуществлялся автором в ходе выполнения комплексных мониторинговых исследований береговой зоны Западного Крыма, проводимых МГИ РАН, в периоды май – июнь и сентябрь – октябрь 2015–2018 гг. Точечный отбор проб грунта осуществлялся с поверхности пляжа и подводного берегового склона на участках, характерных для различных типов берегов Каламитского залива, расположенных от устья р. Альма (пос. Песчаное) на юге до пляжа «Золотые пески» (г. Евпатория) на севере (Рисунок 3.2). За исследуемый период было отобрано 16 проб наносов в зоне заплеска, 14 проб наносов пляжей и 4 пробы на профиле подводного берегового склона в северной части пересыпи оз. Богайлы [Гуров, 2018].

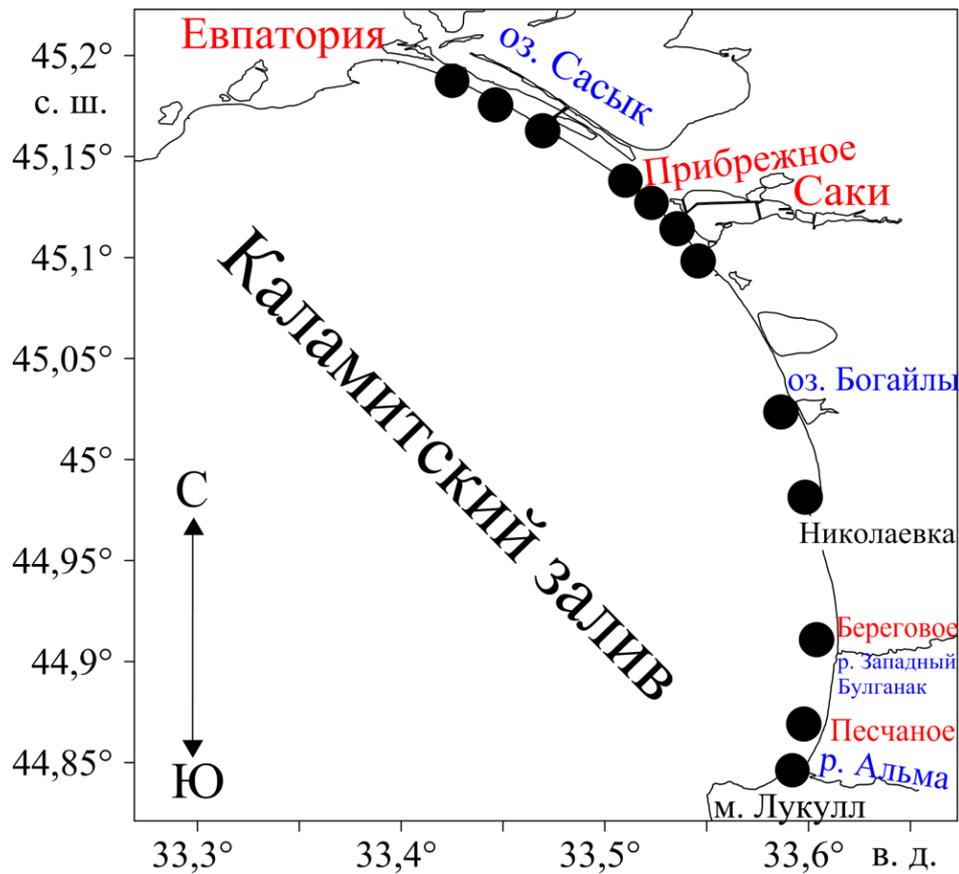


Рисунок 3.2 – Схема расположения точек отбора проб в береговой зоне в Каламитском заливе, 2015–2018 гг.

Сбор материалов поверхностного слоя донных наносов в акватории Лименского залива проводился в ноябре-декабре 2012 г. при выполнении комплексных гидролого-гидрохимических исследований на Черноморском подспутниковом гидрофизическом полигоне ФГБУН ФИЦ МГИ (Рисунок 3.3). Всего было отобрано 12 проб донных наносов. Автор принимал непосредственное участие при отборе проб.

Для анализа особенностей пространственного распределения гранулометрического состава донных наносов Балаклавской бухты использовались пробы, отобранные в поверхностном слое (0–5 см) донных наносов в 2005, 2015, 2018 и 2019 годах. В отборе проб в 2005 г. автор не принимал участия, а пробы, полученные в 2015, 2018 и 2019 гг., отобраны при непосредственном участии автора.

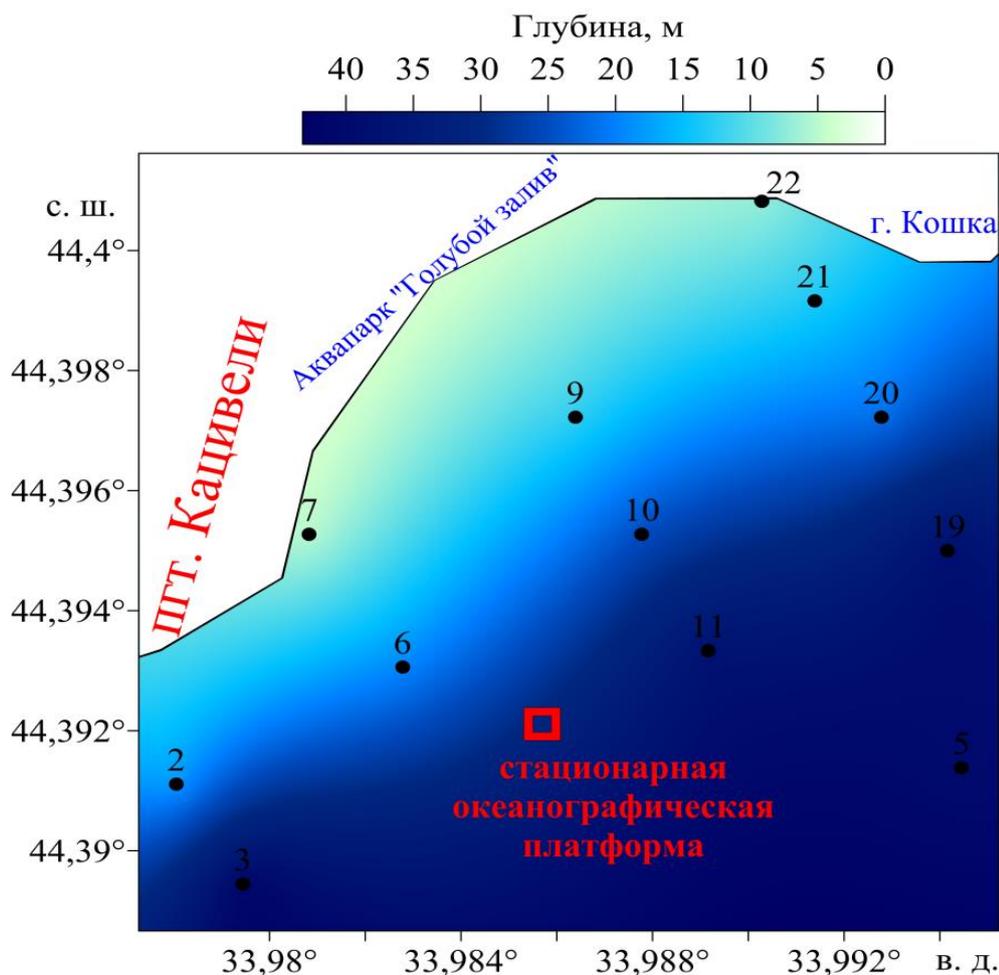


Рисунок 3.3 – Схема станций отбора проб донных наносов на Черноморском подспутниковом гидрофизическом полигоне ФГБУН ФИЦ МГИ (пгт Кацивели)

Расположение станций отбора проб показано на (Рисунок 3.4, а). Используемая в работе схема станций позволяет провести условное районирование акватории, имеющее направление с севера на юг (Рисунок 3.4, б). Районирование проводится на примере станций отбора проб в 2005 г.

В северной, кутовой и наиболее мелководной части расположены ст. 1, 2, 3, в центральной – ст. 4–10. Далее следует наиболее узкая часть Балаклавской бухты (коленивидная узость), в пределах которой находятся ст. 11–14, в южной части и на выходе из бухты – ст. 16 и 17 [Гуров и др., 2015].

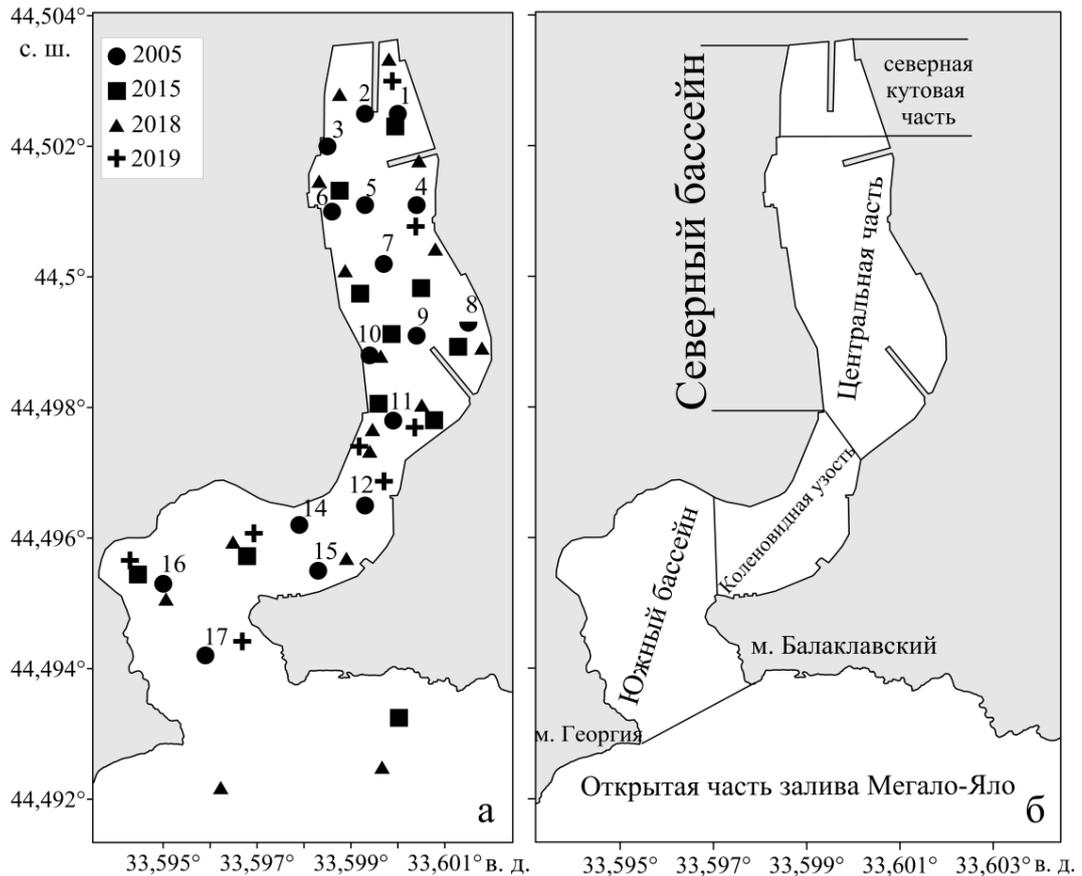


Рисунок 3.4 – Схема расположения станций отбора проб донных наносов (а) и районирование Балаклавской бухты (б)

3.2 Методы исследований

3.2.1 Гранулометрический анализ ситовым методом. В зависимости от крупности наносов в пробах применяются различные методы: частицы размером от 10 мм (галька и валуны) анализируются методом обмера или фотографирования, гравий и пески (размеры от 10 до 0,1 мм) анализируются ситовым методом, для песков и пыли (1–0,01 мм) также может быть применен фракциометр, более мелкие наносы (ил или глины) анализируются методом пипетки.

Гранулометрический состав наносов, характеризующий степень их дисперсности, определяется по массовому содержанию в них частиц различной крупности, выраженному в процентах по отношению к массе сухой пробы грунта, взятой для анализа.

В зависимости от вещественного состава и дисперсности наноса применяются два варианта гранулометрического анализа донных наносов:

а) комбинированный ситовой анализ (метод декантации и рассеивания) – для крупнозернистых псаммито-алевритовых и смешанных наносов;

б) комбинированный гранулометрический анализ (метод декантации и пипетки) – для тонкодисперсных глинистых наносов.

В настоящей работе анализ проводился методом декантации и рассеивания. Отделение алеврито-пелитовой фракции ($\leq 0,05$ мм) выполнялось мокрым просеиванием с последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции ($> 0,05$ мм) разделялись ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит (ГОСТ 12536-2014; введен с 01.07.2015 г.) с рекомендациями [Петелин, 1967].

Ситовый метод используется для разделения и взвешивания крупных фракций (более 0,1–0,05 мм). Анализ выполняется с помощью набора сит с отверстиями 10; 7; 5; 2,5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 мм. Сита располагаются в колонку так, чтобы отверстия уменьшались сверху вниз. Величина навески пробы донного наноса натуральной влажности должна составлять 10–20 г. для глинистых тонкодисперсных наносов и 20–150 г. – для псаммито-алевритовых и ракушечных.

В работе применялся следующий порядок расчета процентного содержания фракций.

Для начала используя полученное значение массы навески влажного (g_b) и сухого (g_c) вещества при определении влажности (ГОСТ Р ИСО 11465-2011; введен с 01.01.2013 г.), рассчитать массу сухого вещества пробы (G_c), взятой для ситового анализа, используя формулу

$$G_c = \frac{G_b * g_c}{g_b}, \quad (3.1)$$

где G_c – масса сухого вещества в пробе для ситового анализа, г;

G_b – масса влажной пробы для ситового анализа, г;

g_b – масса влажной пробы для определения влажности, г;

g_c – масса сухой пробы для определения влажности, г.

Масса сухого вещества пробы наноса (G_c) применялась при расчете долей размерных фракций. Далее рассчитывалась доля недостачи на 1 г. и вычислялась недостача пропорционально массе каждой фракции; значения записывались с плюсом, если суммарная масса фракций ($\sum G_\phi$) меньше массы пробы сухого наноса (G_c) и с минусом, если наоборот. Потери (избыток) грунта при просеивании разносились по всем анализируемым фракциям пропорционально их массам; обычно требуется, чтобы суммарная масса всех фракций составляла 98 – 102% от взятой навески:

Процентное содержание каждой фракции (A , %) в итоге вычисляют по формуле

$$A = \frac{G_\phi}{G_c} * 100, \quad (3.2)$$

где G_ϕ – масса данной пробы наноса, г.;

G_c – масса пробы сухого наноса, взятого для анализа, г.

Способам обработки и интерпретации данных гранулометрического анализа посвящено множество методических работ, как зарубежных [Van Orstrand, 1925; Wentworth, 1929; Trask, 1932; Tanner, 1964], так и отечественных [Рухин, 1947; Шванов, 1969] и методических лабораторных указаний [Коваль, 2001; Пармузина, 2011].

Интерпретация данных гранулометрического анализа заключается, во-первых, в установлении названия отложения; во-вторых, в более детальном определении его структуры (зернистости), и степени сортировки; в-третьих, в определении вероятных условий образования. Название наноса дается по той части, которая составляет свыше 50% материала. Если в наносе значительного

содержания достигают две фракции, в название включают обе фракции. Обычно двойное название зернистости наносов отображает их пониженную отсортированность [Пармузина, 2011]. Иловые наносы можно разделить на алеврито-пелитовые, пелито-алевритовые и алевритовые илы. К алеврито-пелитовым илам отнесены наносы с содержанием $\geq 50\%$ крупно-алевритовой фракции, к пелито-алевритовым – при содержании $\geq 50\%$ мелкоалевритовой и пелитовой фракций. В основу принципов разделения положена классификация по Безрукову – Лисицыну [Безруков и Лисицын, 1960] с изменениями и дополнениями Невесского [Невесский, 1967] для прибрежных морских наносов. Материал, характеризующийся двухвершинными гистограммами, называют смешанным и далее добавляют, какие классы размерности участвуют в его составе (например, песчано-гравийные).

Графические способы изображения гранулометрического состава применяются для придания большей наглядности данным анализа и сопоставления нескольких результатов анализов для их обобщения.

Кумулятивные кривые применяют как для изображения одного анализа и вычисления некоторых характерных коэффициентов, так и для сопоставления небольшого числа анализов. Строятся они, как и гистограммы, в прямоугольных координатах, в простом, логарифмическом или, реже, двойном логарифмическом (когда и по оси ординат откладываются логарифмы содержания фракций) масштабе, а иногда – в произвольном, равном для всех фракций масштабе, независимо от разности конечных их размеров (Рисунок 3.5) [Пармузина, 2011].

Содержание первой, наиболее грубой фракции, откладывается от правого конца ее отрезка на оси абсцисс и на верхнем конце ординаты намечается точка. Вторая фракция откладывается уже от уровня содержания предыдущей, затем переходят к следующей фракции и т.д. Точка ординаты последней фракции должна соответствовать 100%. Полученные точки соединяют плавной линией и получают кумулятивную (суммарную) кривую, или кривую распределения. Если кривые крутые, то осадок по гранулометрическому составу однороден, хорошо

отсортирован, а если кривая пологая – сортировка плохая или ее нет [Пармузина, 2011].

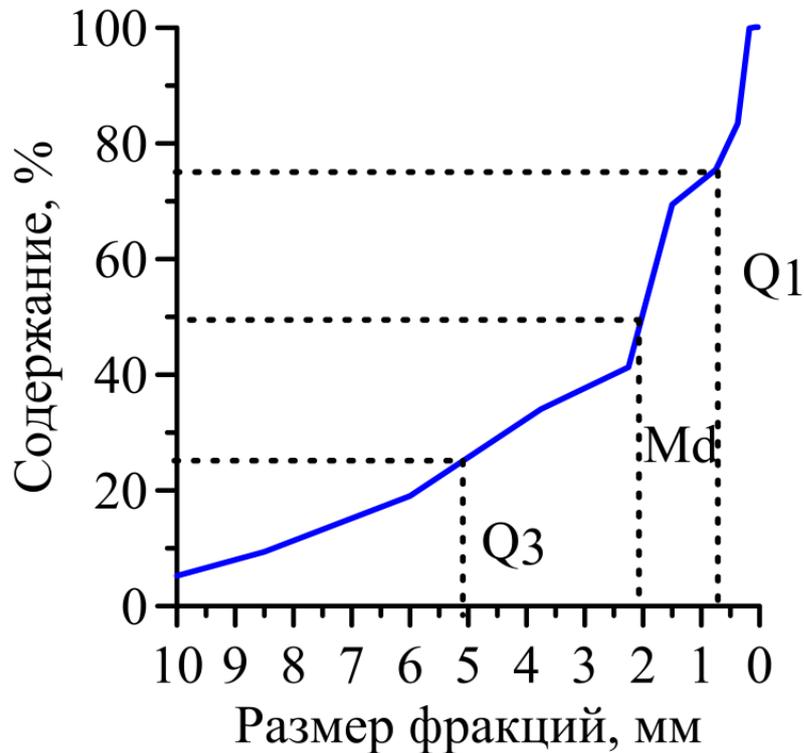


Рисунок 3.5 – Построение кумулятивной кривой, определение первого (Q_1), третьего (Q_3) квартилей и медианного диаметра (M_d)

Кумулятивные кривые, которые могут быть обработаны методами математической статистики, особую ценность представляют для вычисления различных гранулометрических коэффициентов, в частности предложенных Траском [Trask, 1932] и Крумбейном [Krumbein, 1936] среднего, или медианного, диаметра частиц (M_d), коэффициента отсортированности, или сортировки (S_o) и коэффициента несимметричности или асимметрии (S_k). Все эти коэффициенты представляют собой результат обработки кумулятивных кривых методами математической статистики [Пармузина, 2011].

Средний, или медианный, диаметр (M_d), т.е. вторую квартиль, или тот размер зерна, относительно которого половина зерен крупнее, а другая половина – мельче, определяют непосредственно по кумулятивной кривой: из точки кривой с ординатой 50% опускают на ось абсцисс перпендикуляр и определяют искомый

размер. Средний диаметр – важная характеристика гранулометрического состава пробы, поскольку он определяет, хотя часто грубо, ее гранулометрический тип [Пармузина, 2011].

Коэффициент сортировки определяется по формуле

$$S_o = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}, \quad (3.3)$$

где Q_3 и Q_1 – величина третьей и первой квантилей, т. е. размеры частиц, которым отвечают ординаты соответственно 25 и 75%, когда от начала осей координат откладываются наиболее крупные фракции.

Q_3 и Q_1 определяют следующим образом. Из точек ординат, соответствующих 25 и 75%-ным содержаниям, проводят параллельные оси абсцисс горизонтальные линии до пересечения с кумулятивной кривой и из точек пересечения опускают перпендикуляры на ось абсцисс, по которой и читаются в местах пересечения искомые квантильные размеры. В хорошо отсортированных песках и алевритах $S_o < 1,5$; в средне отсортированных $S_o = 1,5 - 2$ и плохо отсортированных $S_o > 2$.

Коэффициент асимметрии (S_k) показывает положение максимальной ординаты, соответствующей преобладающей фракции по отношению к среднему диаметру M_d , т.е. симметричность распределения зерен относительно медианы. Вычисляют S_k по формуле

$$S_k = \frac{(Q_1 - Q_3)}{M_d^2}. \quad (3.4)$$

Если $S_k > 1$, то в осадке преобладает мелкая фракция, при $S_k < 1$ преобладающей будет крупная фракция.

Интерпретация данных гранулометрического анализа является одним из этапов комплексного истолкования литологических особенностей исследуемого материала [Пармузина, 2011].

Представленные выше статистические характеристики гранулометрического состава будут рассчитаны для донных наносов исследуемых районов Крыма и использованы в математических расчетах в качестве начальных условий состава наноса.

3.2.2 Комплексная модель морфодинамики береговой зоны *XBeach*. Для моделирования динамики донных наносов прибрежной зоны применялась *XBeach* – численная модель с открытым исходным кодом, разработанная для моделирования гидродинамических и морфодинамических процессов и воздействий на песчаные берега с размером расчетной области в несколько километров и во временном масштабе отдельных штормов. Детальное описание модели можно найти в [Roelvink et al., 2009; Xbeach..., 2010; Roelvink et al., 2015; Харитонов и др., 2015].

Изначально *XBeach* была разработана для моделирования воздействия экстремальных штормов и ураганов на системы песчаных барьерных островов [McCall et al., 2010; Lindemer et al., 2010] включая их разрушение, эрозию пляжей и дюн, их подтопление, а также затопление внутренних водоемов. Модель *XBeach* является одной из современных моделей (*off-the-shelf models*) легко доступна и постоянно совершенствуется [Elsayed and Oumeraci, 2016; Roelvink et al., 2018] благодаря своему применению для различных участков береговой зоны по всему миру (например, в Европе [Roelvink et al., 2015, 2018; McCall et al., 2010; Bugajny et al., 2013; Dissanayake et al., 2014; Williams et al., 2011, 2015]; Северной Америке [Muller et al., 2018]; Азии [Li and Huang, 2013; Yu et al., 2017; Umeda et al., 2018] и Австралии [Splinter and Palmsten, 2012; Pender and Karunaratna, 2013]).

Эта модель доказала свою способность прогнозировать воздействие шторма, а в отдельных случаях тропических циклонов [Yu et al., 2017] или даже цунами [Li and Huang, 2013] на морфодинамику системы пляж/дюна сложенных

песчаными [Dissanayake et al., 2014; Splinter and Palmsten, 2012; Williams et al., 2011, 2015; McCall et al., 2010; Lindemer et al., 2010; Bugajny et al., 2013], и гравийными [Jamal et al., 2014, McCall et al., 2015; Phillips et al., 2020] фракциями. Кроме того, модель широко применяется для моделирования динамики гранулометрического состава наносов на участках береговой зоны [Ferre et al., 2005; Gallagher et al., 2011; Reniers et al., 2013; Prodger, et al., 2017], а также для оценки влияния растительности на процесс диссипации волнения [Rooijen et al., 2015; Garzon et al., 2019].

В модели *XBeach* используется локальная система координат, в которой ось x ориентирована в направлении берега, примерно перпендикулярно береговой линии, а ось y – вдоль береговой линии. Локальная система координат определяется относительно глобальной системы координат (x_w, y_w) через свое начало в точке (x_0, y_0) и угол поворота α , определяемый относительно оси x_w против часовой стрелки (Рисунок 3.6).

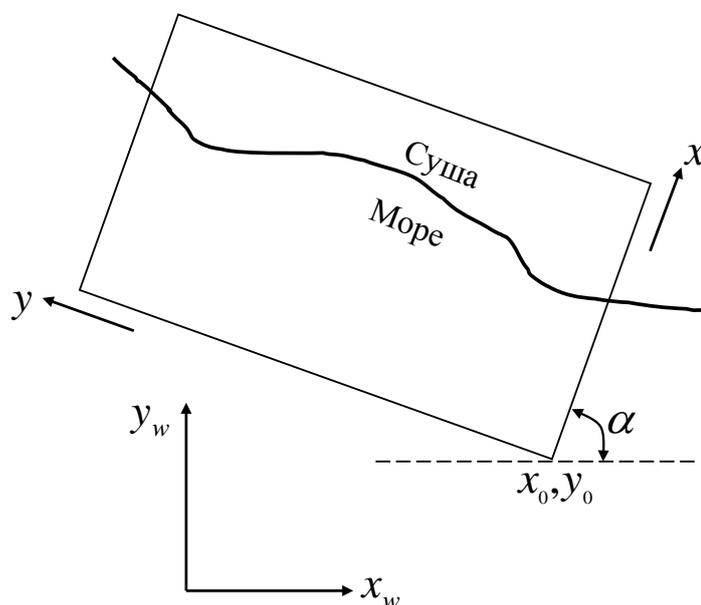


Рисунок 3.6 – Используемая в модели *XBeach* система координат

Короткие волны в *XBeach* описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии в спектральной форме. При этом учитывается угловое

распределение волнового спектра и используется одна пиковая частота, что соответствует предположению об узкополосности спектра в частотной области. Уравнение баланса волновой энергии имеет вид

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = - \frac{D_w}{\sigma}, \quad (3.5)$$

где t – время;

x, y – горизонтальные координаты;

$A = E_w/\sigma$ – плотность волнового действия;

E_w – энергия волн;

σ – собственная частота волн;

θ – направление распространения волн;

D_w – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн;

c_x, c_y и c_θ – скорости переноса энергии в направлении осей x, y и θ .

Второе и третье слагаемые в (3.5) описывают перенос энергии вдоль координат (x, y) , четвертое – учитывает эффекты рефракции волн на рельефе дна и течениях [Харитоновна и др., 2015]. Величина D_w задает скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн [Baldock et al., 1998]. Для описания передачи энергии обрушающихся волн к роллерам используется уравнение баланса энергии поверхностных роллеров E_r

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x E_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y E_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta E_r}{\partial \theta} = D_w - D_r. \quad (3.6)$$

Здесь в качестве источника выступает D_w . При этом скорость диссипации энергии самих роллеров D_r .

Возвышения уровня η и течения, индуцированные короткими и инфрагравитационными волнами, описываются нелинейными уравнениями мелкой воды

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{F_x - \tau_{bx}}{\rho h}, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{F_y - \tau_{by}}{\rho h}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0. \quad (3.9)$$

В (3.7) – (3.9) использованы следующие обозначения:

u, v – компоненты скорости течения;

f – параметр Кориолиса;

g – ускорение силы тяжести;

μ – коэффициент турбулентной вязкости;

ρ – плотность воды;

$h = z_b + \eta$ – динамическая глубина;

z_b – рельеф дна и суши;

τ_{bx}, τ_{by} – компоненты придонных касательных напряжений трения;

F_x, F_y – компоненты индуцированного волнами и роллерами дополнительного импульса [Харитонов и др., 2015].

Эти величины имеют вид:

$$F_x = - \frac{\partial(S_{xx} + R_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial y}, \quad F_y = - \frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{yy} + R_{yy})}{\partial y}, \quad (3.10)$$

где S_{xy}, R_{xy} зависят от E_w, E_r и представляют собой напряжения, обусловленные соответственно наличием ветровых волн и роллеров [Харитонов и др., 2015].

Потоки наносов в *XBeach* определяются выражениями:

$$Q_x = hC_u - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \quad Q_y = hC_v - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial y}. \quad (3.11)$$

Здесь C – осредненная по глубине концентрация наносов,

μ_c – коэффициент турбулентной диффузии.

Изменения C описываются адвективно-диффузионным уравнением вида [Galappatti and Vreugdenhil, 1985]:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = h \frac{C_{eq} - C}{T_s}, \quad (3.12)$$

где C_{eq} – равновесная концентрация;

T_s – время адаптации концентрации к равновесному состоянию:

$$T_s = \max \left(f_{Ts} \frac{h}{w_s}, 0, 2 \right) s, \quad (3.13)$$

которое зависит от глубины h , скорости осаждения наносов w_s и коэффициент переноса наносов по глубине f_{Ts} (по умолчанию – 0,1). Когда T_s приближается к нулю, концентрация наноса мгновенно реагирует на изменение потока. Перемещение и накопление наноса определяется несоответствием между фактической концентрацией наноса C и равновесной концентрацией C_{eq} [Харитонов и др., 2015]. В модели *XBeach* C_{eq} рассчитывается по формуле

$$C_{eq} = \max \left(\min \left(C_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{\max} \right) + \min \left(C_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{\max} \right), 0 \right). \quad (3.14)$$

В уравнении (3.14) минимальное значение равновесной концентрации наносов (влекомых и взвешенных) сравнивается с максимально допустимой концентрацией наносов.

Далее по известным Q_x, Q_y определяются деформации дна из уравнения

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (3.15)$$

$$\text{где } q_x = Q_x + f_s |u| \frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad q_y = Q_y + f_s |v| \frac{\partial z_b}{\partial y},$$

где z_b – координата донной поверхности;

p – пористость грунта; $f_s = 0, 1$.

Чтобы учесть оползание песчаного материала с поверхности дюн на берег во время вызванной штормом эрозии дюн, вводится параметр «avalanching», определяющий эволюцию дна. Avalanching вводится путем использования критического наклона дна как для сухой, так и для влажной зоны (параметр: $wetslp$ и $dryslp$). Считается [Roelvink et al., 2015], что затопленные районы гораздо более склонны к оползням, поэтому используются два отдельных критических склона для сухой и влажной точек (значения по умолчанию – 1 и 0,3 соответственно). Когда указанный ранее критический уклон повышается, материал обменивается между соседними ячейками в количестве, необходимом для возвращения уклона к его критическому значению.

Для разностной аппроксимации уравнений (3.5) – (3.15) используется неравномерная прямоугольная разнесенная сетка. Глубина, уровень, концентрация наносов, энергия волн и роллеров определяются в центрах ячеек, а компоненты скорости, потоки наносов и правые части уравнений (3.9) и (3.10) – в центрах боковых границ [Харитонов и др., 2015]. Интегрирование осуществляется на основе явной схемы с автоматическим выбором временного шага. В разностной схеме реализован предложенный в [Stelling and Duinmeijer, 2003] алгоритм осушения-затопления. Для задания граничных условий на мористой границе используется 2-хмерный частотно-угловой спектр вида:

$$E(\sigma, \theta) = F(\sigma) \cdot \psi(s) \cdot \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \right), \quad \psi(s) = \frac{2^{2s-1} \Gamma^2(s+1)}{\pi \Gamma(2s+1)}, \quad (3.16)$$

где s – показатель степени углового рассеивания волн;

$\Gamma(\dots)$ – гамма-функция;

$F(\sigma)$ – частотный спектр JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), определяемый по формулам

$$F(\sigma) = 0,307 \cdot \alpha_F \cdot \frac{h_s \exp(-1,23a^{-4})}{\sigma_p a^5} s^\beta, \quad (3.17)$$

$$a = \sigma / \sigma_p, \quad \beta = \exp\left(-\frac{(a-1)^2}{2b}\right), \quad b = \begin{cases} 0,07 & \text{при } a \leq 1 \\ 0,09 & \text{при } a > 1 \end{cases}.$$

В (3.17) h_s – высота значительных волн;

σ – частота волн;

σ_p – частота волн соответствующая пику в спектре;

$\tau_p = 2\pi / \sigma_p$ – период пика спектра;

$s = 1000$ – параметр пиковатости спектра;

$\alpha_F = 0,0131$ – обобщенный параметр Филлипса [Holthuijsen, 2007].

Такое значение s выбрано для задания спектра с малым угловым рассеиванием [Roelvink et al., 2015, с. 62], что упрощает использование модели *XBeach*. Значительная высота волны h_s – это среднее значение самой высокой трети волн; вместо h_s также часто используется обозначение $h_{1/3}$. H_s хорошо представляет собой среднюю высоту самых высоких волн в группе волн.

В модели *XBeach* каждый класс донных наносов характеризуется объемной концентрацией $p_{i,j}(x, y, t)$, где i – класс наносов; j – номер слоя наноса; x, y, t – пространственные координаты и время. В начальный момент ($t = 0$) состав слоя был задан в виде:

$$p_{i,j}(x, y, 0) = \bar{p}_{i,j}(x, y) \quad , \quad (3.18)$$

где $\bar{p}_{i,j}(x, y)$ – заданные объемные концентрации.

Средняя объемная концентрация для каждой фракции наноса, рассчитывалась по формуле ($i = 1, 2, 3$)

$$p_i(x, y, t) = \frac{\sum_{j=1}^{nd} p_{i,j}(x, y, t) \cdot \Delta z_j(x, y, t)}{\sum_{j=1}^{nd} \Delta z_j(x, y, t)} \quad , \quad (3.19)$$

где $nd = 3$ – число слоев дна;

$p_{i,j}$ – объемная концентрация каждого класса наноса, для каждого слоя наноса;

Δz_j – вертикальный размер каждого слоя наноса.

С учетом формулы (3.19), медианный диаметр наноса представлялся в виде:

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^{ngd} d_{50}(i) \cdot p_i(x, y, t) \quad , \quad (3.20)$$

где ngd – количество классов наноса.

В нашем случае использовалось три класса наносов, выраженных в виде трех фракций. Следует отметить, что формула типа (3.20), использовалась в работе [Gallagher et al., 2011] для оценки значений d по натурным данным.

Далее с помощью соотношения (3.20) оценивался относительный средний диаметр наноса:

$$D(x, y, t) = 100\% \left(\frac{d(x, y, t)}{d(x, y, 0)} - 1 \right) \quad . \quad (3.21)$$

В данной работе эффект влияния гранулометрических характеристик наноса важен, поэтому состав донного материала, представляется в виде нескольких фракций. В Таблице 3.1 показаны все ключевые параметры модели, используемые для работы с несколькими фракциями наноса и слоями дна.

Каждая фракция наноса характеризуется средним размером частиц (D50) и, возможно, также D15 и D90 (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Основные используемые параметры

Название	Описание	По умолчанию	Предел изменений	Единица измерений
D15	Диаметр, определяющий границу, ниже которой находится 15% частиц	0,00015	0,0001–0,0008	М
D50	Диаметр, определяющий границу, ниже которой находится 50% частиц	0,0002	0,0001–0,0008	М
D90	Диаметр, определяющий границу, ниже которой находится 90% частиц	0,0003	0,0001–0,0015	М
dzg	Толщина слоев верхнего класса наноса	0,1	0,01–1,0	М
dzg2	Номинальная толщина изменяемого слоя наноса	0,1	0,01–1,0	М
dzg3	Толщина слоев нижнего класса наноса	0,1	0,01–1,0	М
nd	Количество вычисляемых слоев дна	3	3–1000	-
Ngd	Количество фракций наноса	1	1–20	-
Por	Пористость	0,4	0,3–0,5	-
Rhos	Плотность твердого наноса (без пор)	2650,0	2400,0–2800,0	kgm ⁻³
sedcal	Калибровочный коэффициент транспорта в зависимости от типа гран состава наноса	1	нет	-
ucrcal	Критическая скорость	1	нет	-

Указав несколько слоев дна, *XBeach* позволяет следить за различными фракциями наносов по горизонтали и по вертикали. Толщина различных слоев может быть установлена отдельно (параметр: *dzg1*, *dzg2* и *dzg3*) или сразу (параметр: *dzg*).

Входные параметры наносов определяют их начальное распределение на дне. Простейшая ситуация – это использование модели *XBeach* для равномерно распределенных по площади дна гранулометрически однородных наносов. В этом случае не учитываются пространственные особенности распределения фракций, но таким образом упрощается процесс моделирования и сокращается затраченное на математические расчеты время. Для этого достаточно указать общий размер частиц, используя параметр *D50*, указывающий на медианный диаметр частиц. Для того, чтобы указать начальное распределение наносов подробнее используются дополнительные параметры *D15* и *D90*, а также величины пористости (*por*) и плотности наносов (*rhos*) (Таблица 3.1).

Дифференциация гранулометрического состава наносов определяется следующим образом. Файлы состава дна содержат информацию о том, какое количество определенной фракции находится в каждой ячейке сетки в начале моделирования. Значения являются объемной долей описываемой фракции. Например, если некоторая ячейка сетки заполняется только первой фракцией наносов, значение, соответствующее этой ячейке сетки будет только в файле *gdist1.inp*, а во всех остальных будет равно нулю. В случае, если определено пять фракций наносов и конкретная ячейка сетки заполняется одинаково по объему всеми фракциями, то значение, соответствующее этой ячейке сетки будет $1/5 = 0,2$ во всех файлах.

На основе полученных статистических характеристик гранулометрического состава донных наносов прибрежной и береговой зон для дальнейшего использования в качестве входных параметров для модели *XBeach* было выбрано три фракции. Состав наносов задавался в виде смеси из трех компонентов: мелкозернистый гравий (фракция 2–1 мм) и крупнозернистый песок (фракция 1–0,5 мм); среднезернистый песок (фракция 0,5–0,25 мм); мелкозернистый песок

(фракция 0,25–0,1 мм). В Таблице 3.2 приведены используемые в качестве входных параметров в модели *XBeach* значения медианного диаметра D50 и величин D15 и D90, а также диапазон их изменения, [XBeach, 2010], полученные при построении кумулятивной кривой для каждой фракции по результатам гранулометрического анализа проб грунта.

Таблица. 3.2 – Гранулометрические характеристики фракций наносов, используемые в настоящей работе для всех районов в качестве входных параметров для моделирования

Фракция	D90, мм	D50, мм	D15, мм
Мелкозернистый гравий и крупнозернистый песок	1,5	0,8–0,5	0,65
Среднезернистый песок	0,5	0,375–0,3	0,25
Мелкозернистый песок	0,3–0,175	0,15–0,1	0,1

Выводы к главе 3

В третьей главе рассмотрены основные материалы и методы изучения особенностей гранулометрического состава, а также параметры и особенности применения модели динамики береговой зоны (*XBeach*).

Показано, что в настоящей работе для исследования состава крупнозернистых псамито-алевритовых, смешанных донных наносов применялся комбинированный ситовой анализ (метод декантации и рассеивания). Представлен подробный ход выполнения анализа и особенности обработки результатов измерений, в том числе применяемый в работе порядок расчета процентного содержания фракций, величин среднего медианного диаметра (M_d) и коэффициента сортировки (S_k). Отмечено, что основным способом графического изображения гранулометрического состава является построение гистограмм и кумулятивных кривых.

Для моделирования динамики донных наносов на участках прибрежной и береговой зон применялась модель *XBeach*. Показаны особенности используемой в модели системы координат; уравнений гидродинамики, транспорта наносов и

деформаций дна. Параметры ветрового волнения задавались на мористой границе расчетной области с помощью спектра *JONSWAP*.

Особенности аппроксимации характеристик донных наносов, используемых в модели *XBeach*, состоят в том, что возможно использование нескольких фракций наноса, для каждой из которых задаются свои значения величин среднего медианного диаметра (D_{50}) и, дополнительных величин D_{15} и D_{90} , полученных при построении кумулятивной кривой для каждой фракции по результатам гранулометрического анализа проб грунта. Начальный состав донных наносов задавался в виде смеси из трех компонентов. Количество вещества каждой фракции в смеси выражено в объемных концентрациях, соответствующих долевого содержанию данного материала в единичном объеме.

Результаты исследований, представленные в третьей главе работы, опубликованы в [Fomin et al., 2016; Гуров и др., 2019; Gurov et al., 2019; Гуров и Фомин, 2021, 2021a]

ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ КРЫМА

4.1 Каламитский залив

4.1.1 Наносы мористой и прибрежной зон. По материалу, который содержался в донных наносах мористой части, пробы можно было разделить на три группы: алеврито-пелитовый ил, пелито-алевритовый ил и ракушечный гравий с детритовым песком (Таблица 4.1). Процентное соотношение гранулометрических фракций наносов мористой части залива было следующее: 18,5% – гравийная фракция, 9,2% – песчаная и 72,3% – илистая (Рисунок 4.1, а, в).

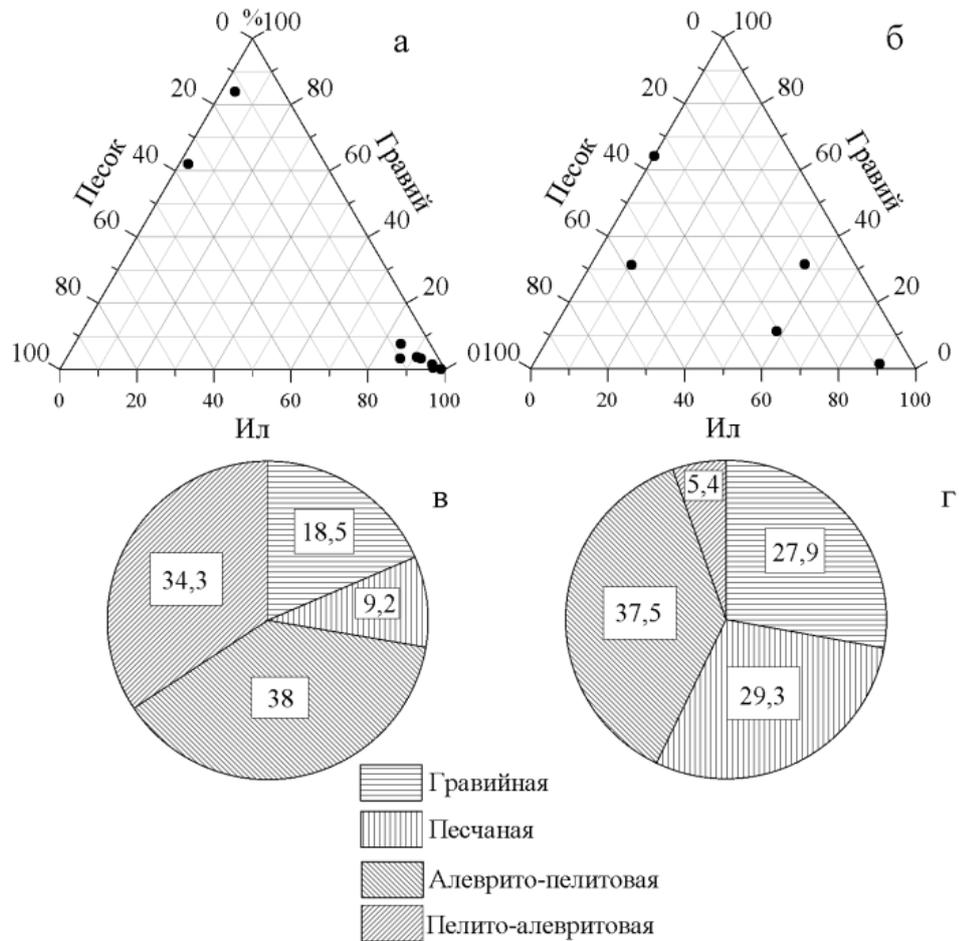


Рисунок 4.1 – Трехкомпонентная (а, б) и круговая (в, г) диаграммы фракционного состава донных наносов Каламитского залива в 2011 (а, в) и 2012 (б, г) гг.

Далее подробнее остановимся на анализе количественных особенностей гранулометрического состава и пространственном распределении материала (Рисунки 4.2 и 4.3).

Таблица 4.1 – Гранулометрический состав донных наносов в мористой части Каламитского залива (69-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», август 2011 г.) [Гуров и др., 2014]

№ ст.	Содержание фракций донных наносов, %				Название наносов
	Гравийная	Песчаная	Крупноалевритовая	Мелкоалевритовая и пелитовая	
	10–1 мм	<1–0,1 мм	<0,1–0,05 мм	<0,05–0,001 мм	
14	62,22	35,83	2,24	0	Ракушечный гравий с детритовым песком
13	1,48	2,61	64,93	30,96	Ил алеврито-пелитовый
12	0,21	0,94	83,71	15,15	Ил алеврито-пелитовый
11	3,36	9,97	37,33	49,34	Ил пелито-алевритовый
9	0,59	2,9	42,33	54,15	Ил пелито-алевритовый
8	3,36	4,6	41,44	50,56	Ил пелито-алевритовый
5	7,68	7,63	25,14	59,50	Ил пелито-алевритовый
2	83,84	12,59	2,14	1,28	Ракушечный гравий с детритовым песком
1	3,64	5,55	43,13	47,64	Ил пелито-алевритовый

Фракция песков (фракция 1–0,1 мм) была представлена в наносах мористой части слабо (Рисунок 4.2, а). Граница распространения песчаного материала проходила по изобате 20 метров. Максимальные значения были приурочены к прибрежным областям и районам мысов. Повышенные значения на ст. 14 и 11, по-видимому, объяснялись расположением в этом районе древнего подводного

бара. Что касается размерностей, то песчаная фракция мористой части залива была представлена мелкозернистыми и крупнозернистыми песками (ст. 14, 2).

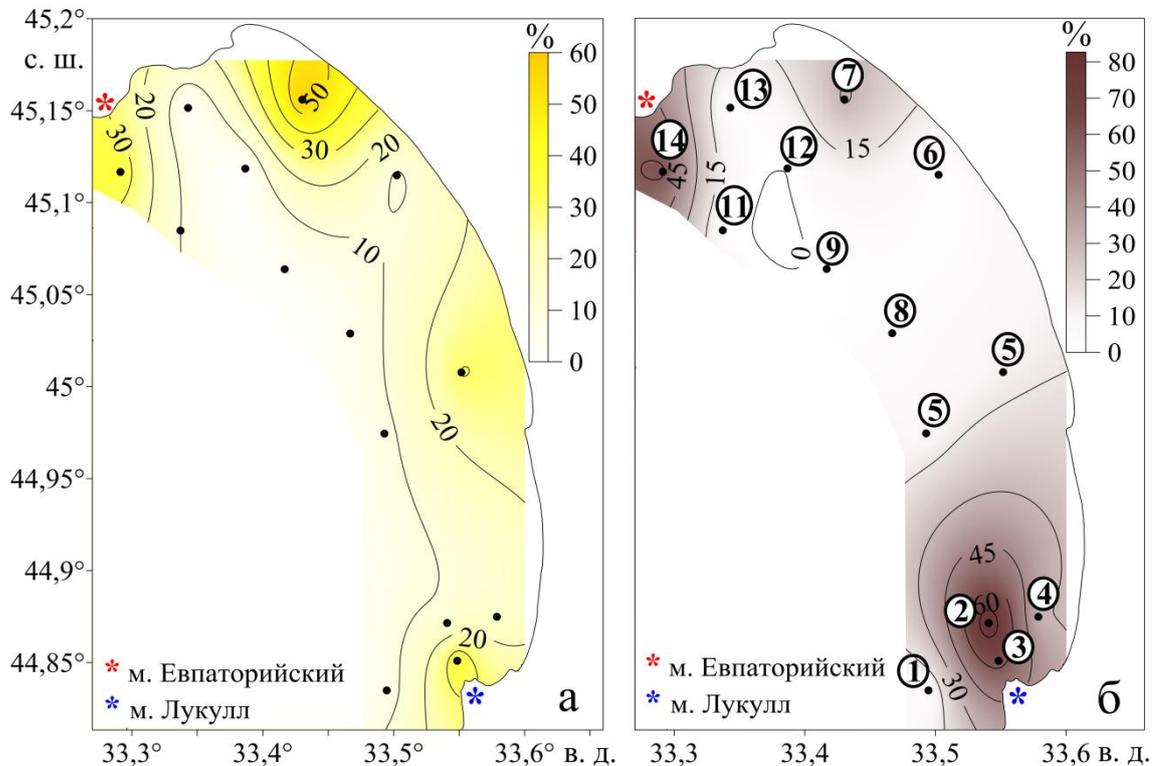


Рисунок 4.2 – Пространственное распределение песчаной (а) и гравийной (б) фракций в поверхностном слое (0–5 см) донных наносов Каламитского залива в августе 2011 г. – сентябре 2012 г., цифрами в кружечках показаны номера станций отбора проб

Максимальная доля крупнозернистого материала (фракция 10–1 мм) была отмечена на двух прибрежных станциях, приуроченных к крайним точкам залива, на севере – м. Евпаторийский и м. Лукулл на юге. В вещественном плане материал вблизи м. Евпаторийского был представлен мелкогравийной фракцией раковинного детрита (2–1 мм) составившей 30%. В южной части акватории вблизи м. Лукулл преобладала доля крупногравийного материала (40,5%), отмечено большое количество крупных раковин (Рисунок 4.2, б).

Более 70% состава наносов глубоководной части Каламитского залива было представлено мелкозернистыми илистыми отложениями. По вещественному

составу мелкозернистый материал разделялся на алеврито-пелитовые и пелито-алевритовые илы.

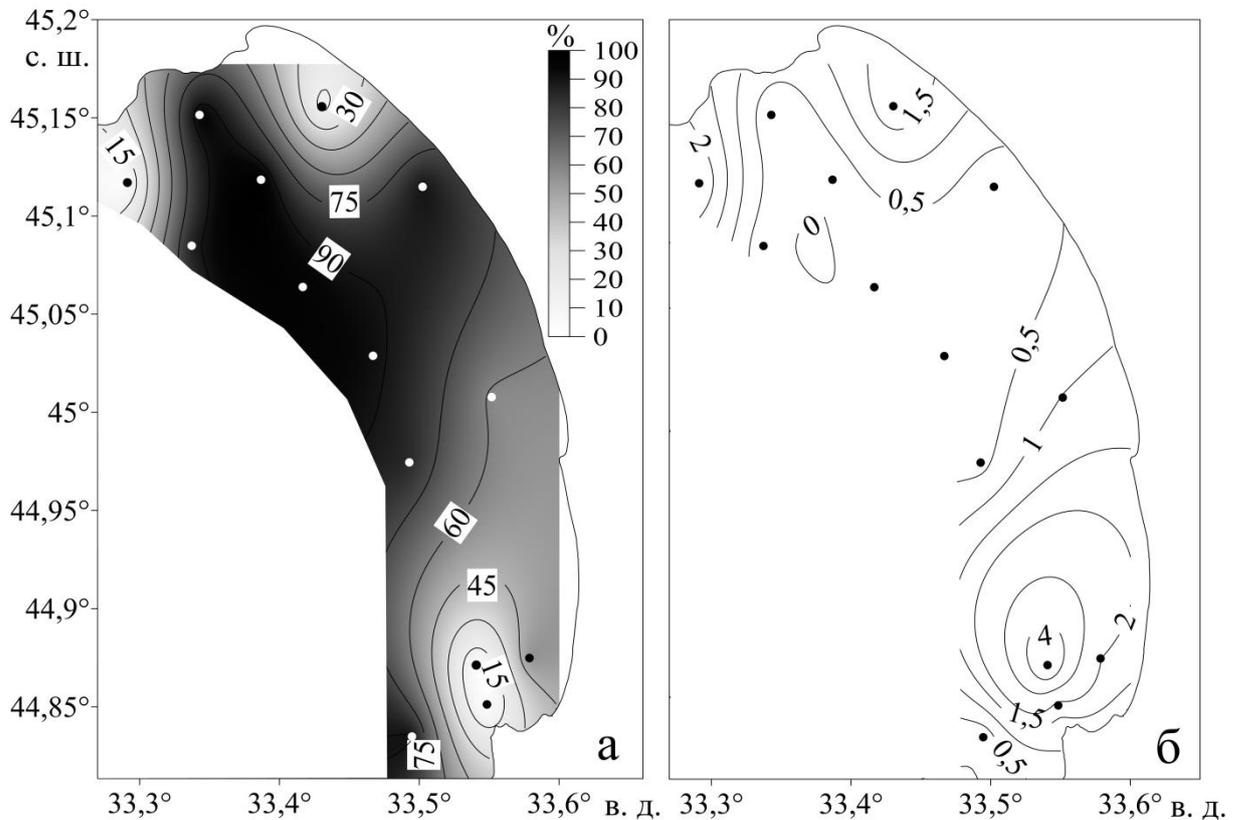


Рисунок 4.3 – Пространственное распределение илистой фракции (%) (а) и среднего размера частиц (мм) (б) в поверхностном слое (0–5 см) донных наносов Каламитского залива в августе 2011 г. – сентябре 2012 г.

Фракция пелито-алевритовых илов преобладала в центральной, глубоководной части акватории ограниченной изобатой 20–25 м (Рисунок 4.3, а). Здесь ее содержание изменялось от 49,3% до 59,5%. Алеврито-пелитовые илы были расположены в северной, мелководной (до 20 м) части акватории (ст. 13, 12). В общем, содержание илистой фракции изменялось в мористой части акватории от 2,2% вблизи г. Евпатория и 3,4% возле м. Лукулл до 98,9% в центральной части акватории.

Донные наносы в прибрежной части более разнообразны и были представлены тремя примерно равными группами: ил алеврито-пелитовый с детритовым песком (42,9%), песок пелитовый с детритом (29,3%) и ракушечный

гравий с детритовым песком (27,9%) (Рисунок 4.1, б, г и Таблица 4.2) [Гуров и др., 2014].

Таблица 4.2 – Гранулометрический состав донных наносов в прибрежной части Каламитского залива (НИС «Риони», сентябрь 2012 г.)

№ ст.	Содержание фракций донных наносов, %				Название наносов
	Гравийная	Песчаная	Крупноалевритовая	Мелкоалевритовая и пелитовая	
	10–1 мм	<1–0,1 мм	<0,1–0,05 мм	<0,05–0,001 мм	
3	64,25	35,94	0	0	Ракушечный гравий с детритовым песком
4	31,39	13,13	34,81	20,62	Ил алеврито-пелитовый с ракушечным гравием и детритовым песком
5	11,34	30,53	53,63	4,53	Ил алеврито-пелитовый с детритовым песком
6	1,39	8,68	88,55	1,68	Ил алеврито-пелитовый с детритовым песком
7	31,25	58,25	10,25	0,28	Песок с ракушечным детритом

Разнообразие фракционного состава донных наносов в прибрежной зоне связано как с источниками их питания, так и с гидродинамической активностью.

Максимальное содержание гравийного материала было отмечено вблизи м. Лукулл, что в первую очередь определялось поступлением терригенного материала в результате абразионного воздействия на основание клифа. На ст. 3 преобладала доля мелкогравийного материала (42%), представленного раковинным детритом, на ст. 4 – крупногравийного (16%) с включениями

крупных раковин. В целом, было отмечено, что по мере удаления от м. Лукулл доля гравийного материала сильно сокращалась.

Пески в прибрежной зоне были представлены равномерно. Преобладала мелкозернистая фракция (0,25–0,1 мм). Наличие крупнозернистых песков отмечалось в районе м. Лукулл и пересыпи оз. Сасык.

Илистый материал прибрежной части акватории был представлен алеврито-пелитовой фракцией, доля которой изменялась от 10,3% до 88,6%. Повышенное содержание илов (90%) наблюдалось в районе пересыпи оз. Сакское (ст. б). Отмеченная вытянутость изолиний повышенного содержания илистого материала в прибрежной зоне к берегу в районе Сакских озер, по-видимому, была связана с геологическим прошлым данного участка. Согласно литературным данным [Зенкович, 1958, 1960], ранее данная область представляла собой лагуну, в которой накапливался мелкозернистый материал. В дальнейшем, в результате регрессии берега и образования современных пересыпей илистый материал был погребен под толщей песчаных наносов.

Средний размер частиц для наносов мористой части изменялся от 0,1 мм для мелкозернистых наносов в центральной котловине залива до 5,21 мм на станциях, расположенных вблизи мысов и подводных валов, характеризующихся неоднородным рельефом дна, а для прибрежных проб от 0,13 мм вблизи пересыпи оз. Сакское до 2,03 в районе м. Лукулл (Рисунок 4.3, б). В первую очередь, увеличение среднего размера частиц определялось включением ракушечного материала, особенно в районе м. Лукулл.

В дальнейшем, для изучения особенностей динамики донных наносов в прибрежной и береговой зонах, полученные в данной главе результаты гранулометрического анализа, отраженные в виде статистических характеристик размерного состава, будут использованы в модели *XBeach* в качестве начальных значений состава наноса на мористой границе.

4.1.2 Наносы береговой зоны. Особенности гранулометрического состава наносов береговой зоны отображены в виде гистограмм распределения

процентного содержания фракций (Рисунки 4.4 и 4.6) и кумулятивных кривых (Рисунки 4.5 и 4.7).

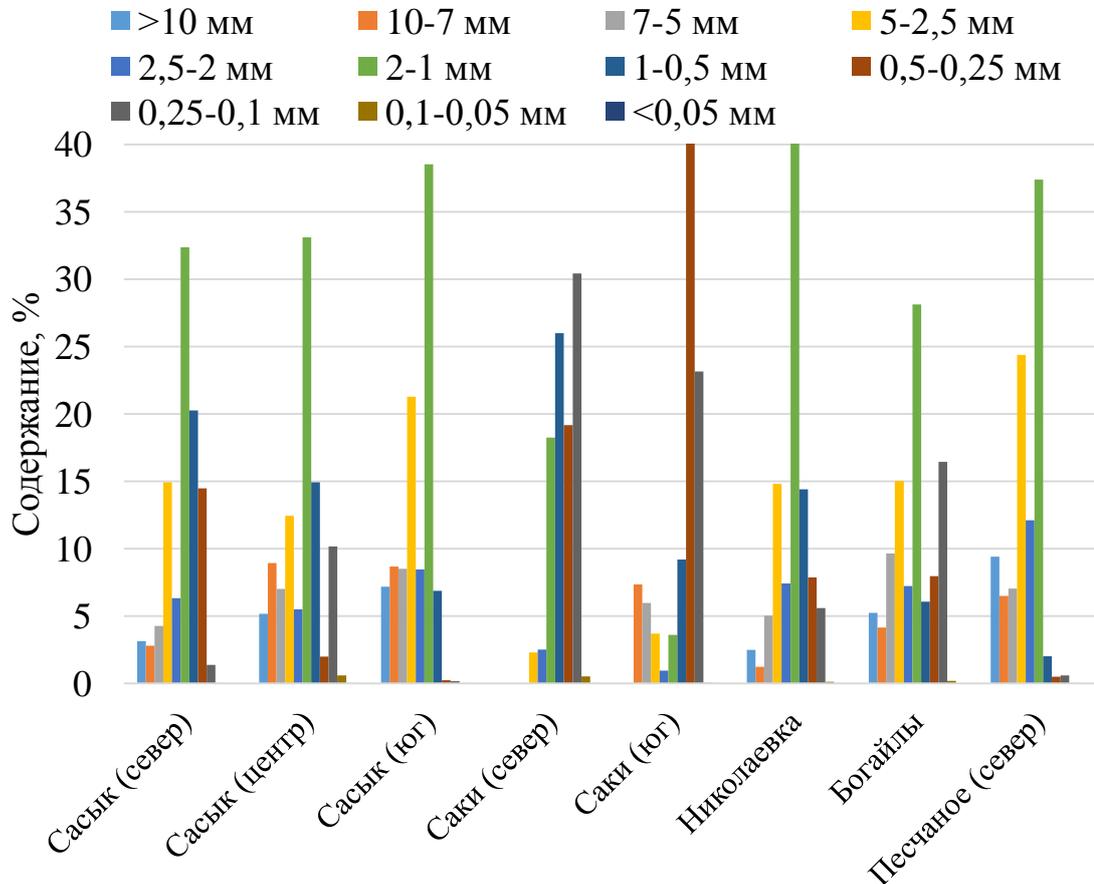


Рисунок 4.4 – Гистограмма распределения процентного содержания размерных фракций в пробах наносов, отобранных вблизи уреза

В вещественном плане наносы приурезовой части береговой зоны были представлены средне- и мелкогравийным материалом с включениями крупнозернистой гальки и мелкозернистых песков (Рисунок 4.4).

В гранулометрическом составе наносов приурезовой зоны во всех пробах за исключением района устья р. Альма, преобладала фракция мелкозернистого гравия (2–1 мм). Ее содержание изменялось от 50,4% в северной части пересыпи оз. Сасык до 7% на пересыпи оз. Сакское, где мелкая галька заменялась наносами средней (40%) и крупной (36%) зернистости. Далее на юг, приурезовая зона пересыпи оз. Богайлы была сложена фракцией 2–1 мм, а ее содержание достигало

максимальных для всего района залива значений (51%). По мере дальнейшего продвижения на юг содержание галечного материала сокращалось, а включения мелкозернистых песков увеличивались. В результате, в районе впадения в залив р. Альма песчаный материал полностью замещал галечный. Это также подтверждалось распределением значений медианного диаметра (M_d).

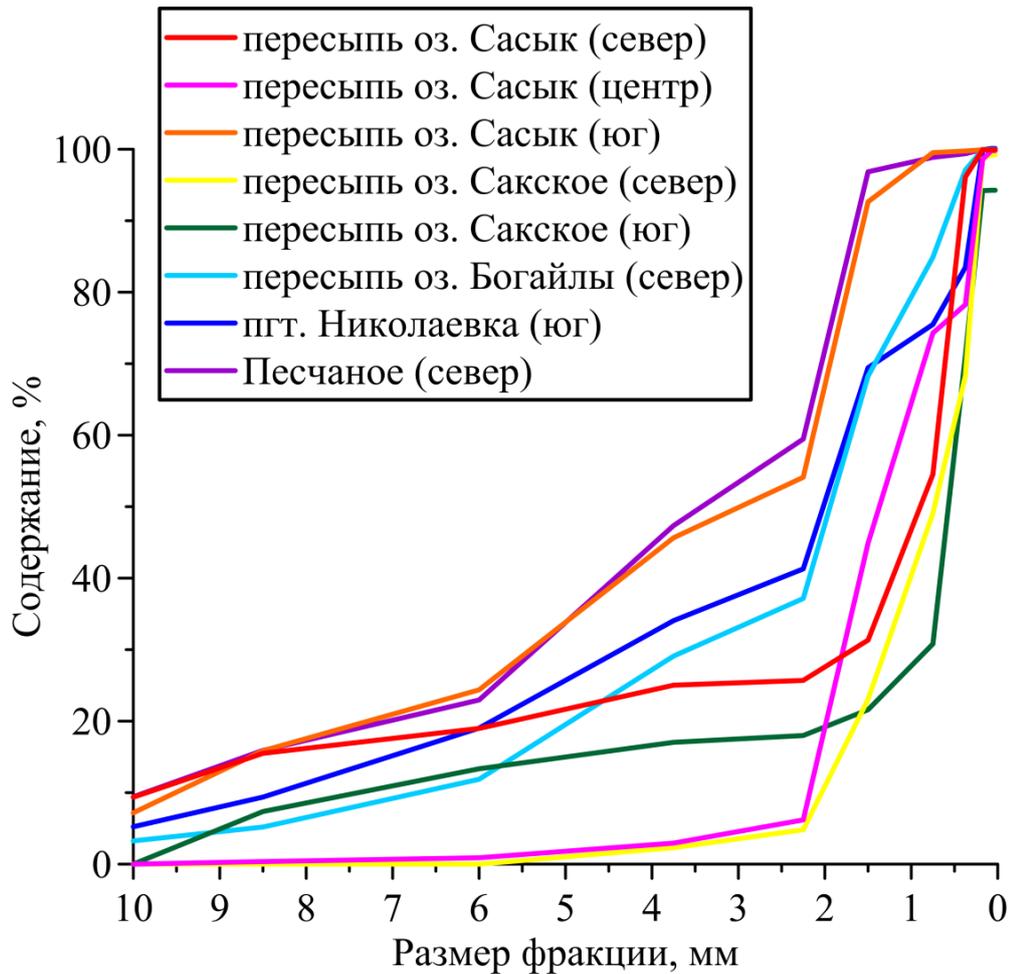


Рисунок 4.5 – Кумулятивные кривые для проб, отобранных в береговой зоне Каламитского залива на урезе в период 2015–2017 гг.

Пробы, отобранные на урезе, характеризовались различной степенью сортировки, изменяющейся в пределах 1,26–2,6. В целом, материал был хорошо сортирован в центральной части береговой зоны залива и средне сортирован в северной и южной частях (Рисунок 4.5).

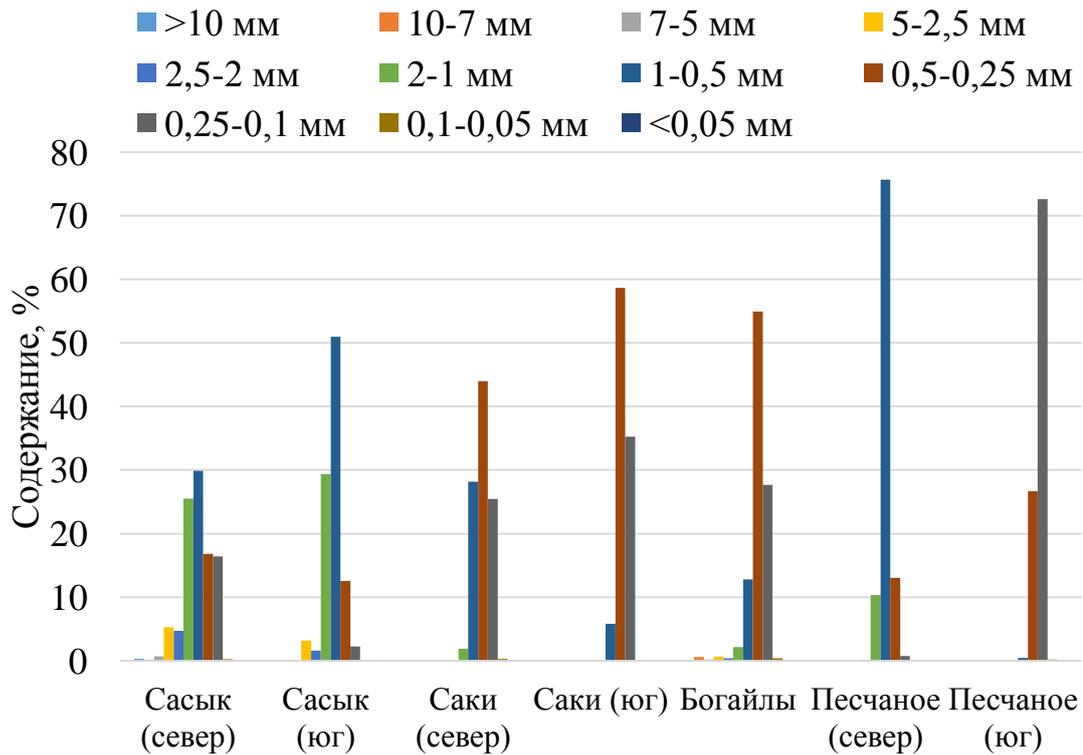


Рисунок 4.6 – Гистограмма распределения процентного содержания размерных фракций в пробах наносов, отобранных на пляже

Пляжевые наносы Сасыкской пересыпи в северной части, согласно полученным данным, были представлены песчаными наносами различной крупности (Рисунок 4.6). Преобладала фракция 0,5–0,25 мм (39%), включения крупнозернистого и мелкозернистого песка составляли соответственно 24% и 28%. Кроме того, отмечалось значительное сокращение доли гравийного материала в наносах пляжа (9%). В целом наносы северной части пересыпи оз. Сасык отличались средней степенью сортировки, а их медианный диаметр был равен 0,58 [Гуров, 2018, 2020].

В центральной части пересыпи на особенности распределение наносов береговой зоны оказывала влияние железобетонная конструкция длиной ~40 м, расположенная поперечно берегу. Перехватывая поток наносов, направленный с юга, гидротехническое сооружение существенным образом влияло на гранулометрический состав материала, перемещающегося вблизи уреза. Южнее бетонных конструкций в пробе, отобранной на урезе, преобладала гравийная

фракция крупной (41,4%) и мелкой (35,3%) зернистости. Севернее доля гравийного материала заметно сокращалась, а представлен он был только мелкозернистой фракцией (42%) [Гуров, 2018, 2020].

По мере продвижения на юг, в районе пос. Прибрежное (Рисунок 3.2), пересыпь была преимущественно сложена крупнозернистым песком, доля фракции (1–0,5 мм) составила 51% (Рисунок 4.6). Здесь была заметно выше доля мелкой гальки (29%). Пляжевые наносы южной части пересыпи были лучше сортированы ($S_0 = 1,4$) [Гуров, 2018]. Отмечено, что полученные данные гранулометрического состава наносов пляжей отличались от данных представленных в работе [Шуйский, 2007], доля гравийного материала сократилась с 40 до 34%, а фракция мелкозернистых песков (0,25–0,1 мм) с 45 до 10% [Гуров, 2018].

В пробах, отобранных на урезе, по мере продвижения с севера на юг увеличивалась доля гравийно-галечного материала от 63,8% в северной части пересыпи до 72,2 в центральной и 92,6% в южной, что согласуется с данными [Зенкович, 1960]. В тоже время было отмечено, что степень сортировки материала на урезе в пределах пересыпи оз. Сасык не изменялась и составила 1,81. Отсутствие в данном районе источников гравийно-галечного материала подтверждает тот факт, что основное питание данного участка береговой зоны происходит в результате вдольберегового перемещения наносов потоком, направленным с юга на север [Гуров, 2018].

Пересыпь оз. Сакское имеет меньшую ширину, сложена крупнозернистыми песками с примесью гравия и гальки, а основным источником ее питания является вдольбереговой поток, направленный с юга [Зенкович, 1960]. В работе [Иванов, 2006] отмечалось, что механический состав пляжевых наносов Сакской пересыпи представлен мелкозернистыми песками [Гуров, 2018].

Анализ проб, отобранных в 2015–2017 гг. вблизи уреза, показал, что по мере продвижения на юг заметно уменьшалось количество крупнозернистого гравийного материала, при этом соотношение гранулометрических фракций менялось. В южной части исследуемой области преобладали фракции средних и

мелкозернистых песков с включением крупногравийного материала (19%). В наносах приурезовой зоны в северной части пересыпи концентрации среднезернистого песка уменьшались, а доля мелкозернистого возрастала. По-видимому, это происходит в результате перехвата крупнозернистых частиц наносов гидротехническими сооружениями. Это подтверждалось изменением соотношений для гравийного материала: доля мелкозернистых фракций (2,5–1 мм) увеличивалась с юга на север от 4,5 до 20,8%, а крупнозернистых (10–5 мм) сокращалась от 18,8% до 0. В центральной части пересыпи наносы в приурезовой зоне были представлены смесью гравийного и песчаного материала средней крупности. Для этих наносов была характерна наихудшая степень сортировки ($S_0 = 2,83$), как для пересыпи оз. Сакское, так и для всех исследуемых проб наносов береговой зоны [Гуров, 2018, 2020].

В составе наносов пляжа преобладала фракция среднезернистых песков (0,5–0,25 мм). Ее содержание изменялось от 44% в северной части до 58,7% в южной. Для проб, отобранных в зоне пляжа, также отмечалось уменьшение доли среднезернистого песчаного материала и увеличение содержания мелкозернистого в направлении с юга на север. Материал пляжей в южной части пересыпи оз. Сакское был лучше сортирован, чем в северной. Среднее содержание мелкозернистой фракции – 35%, что говорит о том, что по сравнению с данными [Иванов и др., 2006] материал пересыпи стал крупнее [Гуров, 2018].

Результаты гранулометрического анализа проб, отобранных в районе пересыпи оз. Богайлы в 2015 и 2017 гг., показывают, что за исследуемый период состав наносов незначительно изменился в приурезовой зоне. Сократилась доля гравийного материала с 75,5 до 68,2%. Увеличилась дифференциация материала, в результате чего величина S_0 возросла с 1,3 до 1,9. В целом в пробах, отобранных на уресе, преобладала фракция мелкозернистого гравия (39,1%) с включениями крупно и среднезернистого песка. Наносы пляжей были образованы песком средней (54,9%) и мелкой (27,7%) зернистости, а коэффициент сортировки составил 1,4 (Рисунок 4.7) [Гуров, 2018].

Согласно наблюдениям, в результате штормового воздействия на поверхности пляжа отмечалось перекрытие поверхностного слоя наносов полосами галечного материала мелкой и средней крупности, распределенного тонким слоем параллельно берегу.

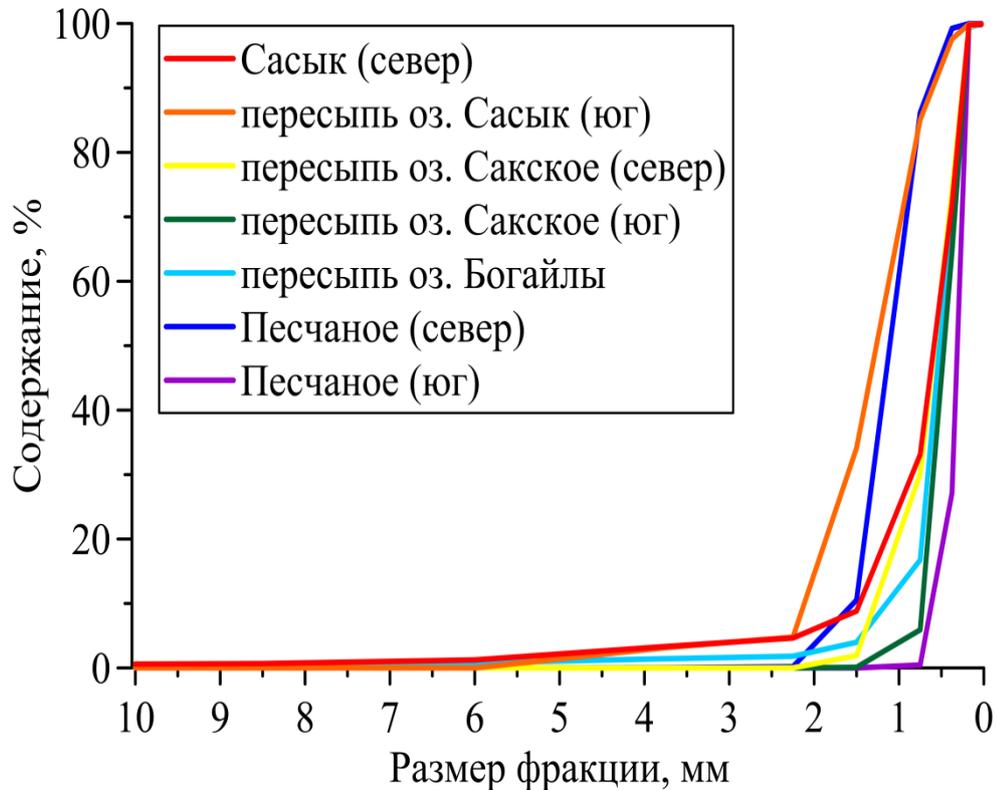


Рисунок 4.7 – Кумулятивные кривые для проб, отобранных в береговой зоне Каламитского залива на пляже в период 2015–2017 гг.

Исследование особенностей распределения наносов на подводном береговом склоне в районе пересыпи оз. Богайлы показало следующее:

- на глубине 1–1,5 м преобладала смесь песчаного материала мелкой и средней зернистости с мелким гравием;
- на глубине около 2 м гравийно-песчаный материал сменялся мелкозернистым илистым песком;
- глубже 2,5 м были сконцентрированы преимущественно алевриты с примесью мелкого песка и появлялась фракция пелитов;

– в диапазоне глубин от 2–2,5 м до 4 м в пробах не были зафиксированы частицы с размером более 0,25 мм [Гуров, 2018; Гуров и др., 2019].

Таким образом, показано, что дифференциация прибрежно-морских наносов в районе пересыпи оз. Богайлы ограничивалась изобатами 2–2,5 м, глубже накапливались мелкозернистые илистые фракции.

В работе [Шуйский, 2007] было указано, что в составе пляжевых наносов в районе пгт Николаевка преобладали галечные фракции с включением крупнозернистых и среднезернистых песков. Анализ проб, отобранных в 2015 г. вблизи уреза на участке севернее пгт Николаевка, показал, что в гранулометрическом составе по-прежнему преобладает доля гравийно-галечного материала различной крупности. Доля мелкого гравия (2,5–1 мм) составила 35,4%, также отмечено содержание мелкозернистого песка (16,5%). Верхняя часть ПБС была сложена преимущественно песчаными фракциями, отмечено незначительное содержание алевритового материала [Гуров, 2018].

Результаты анализа гранулометрического состава проб, отобранных в 2016 г. на участках к северу и к югу от пос. Песчаное, полностью согласуются с ранее полученными для данного региона данными [Зенкович, 1960; Шуйский, 2007]. Показано, что в северной части пос. Песчаное наносы в приурезовой полосе были представлены на 97% гравийным материалом, фракция 2,5–1 мм – 49,5%. Наличие такого количества гравийно-галечного материала определяется особенностями строения и динамики береговых клифов, материал которых является основным источником питания наносов. Непосредственно в районе устья гравийный материал в наносах на урезе полностью отсутствовал, а доля мелкозернистого песка составила 90,5% [Гуров, 2018].

Пляжевые наносы в северной части пос. Песчаное (Рисунок 3.2) были представлены крупнозернистыми песками с включением мелкого гравия (10%) и среднезернистого песка (13%). В южной части преобладала фракция мелкозернистых песков, которая по мере удаления от устья реки изменялась от 35,6% до 72,6%. Уменьшение доли гравийно-галечного материала в наносах береговой зоны в южной части пос. Песчаное, по-видимому, определялось

отсутствием прямых источников его поступления с суши, а также тем фактом, что крупнозернистый материал, переносимый потоком с севера, полностью перехватывается расположенными в этом районе берегозащитными сооружениями. Кроме того, сток р. Альма вносит вклад в накопление фракции мелкозернистых песков в приустьевой области [Гуров, 2018].

Наносы к северу от пос. Песчаное отличались хорошей степенью сортировки ($S_o = 1,27$), а в южной части района материал был плохо сортирован ($S_o = 2,46$) (формула расчета S_o см. стр. 68, формула 3.3).

Результаты выполненных исследования показали, что вещественный состав донных наносов, отобранных в мористой и прибрежной частях Каламитского залива, имеет ряд различий. Донные наносы мористой части были представлены в основном ракушечным гравием с детритовым песком и илом, как алеврито-пелитовым, так и пелито-алевритовым.

Особенности дифференциации материала наносов береговой зоны определялись местами расположения источников его поступления, характером размещения гидротехнических сооружений и направлением вдольберегового перемещения наносов.

Полученные результаты позволили дополнить имеющиеся ранее сведения о гранулометрическом составе донных наносов прибрежной зоны Каламитского залива, а также получить новые данные на участках береговой зоны от пересыпи оз. Сасык до устья р. Альма. Полученные величины позволили выделить границы распределения гравийного и песчаного материала различной крупности по профилю подводного берегового склона, а также уточнить границу появления алеврито-пелитовой фракции в береговой зоне. Новые данные будут адаптированы и использованы в модели *XBeach* в качестве начальных значений состава наноса в береговой зоне на исследуемых участках пересыпи оз. Сасык, пересыпи оз. Богайлы и набережной в пгт Николаевка.

4.2 Лименский залив

Результаты исследования донных наносов на полигоне указывали на их неоднородность по гранулометрическому составу. Донные наносы здесь были представлены в основном заиленными песками (фракция 0,25–0,1 мм) с галькой и ракушечником и, в меньшей степени, алеврито-пелитовыми илами (фракция 0,1–0,05 мм) (Таблица 4.3; Рисунки 4.8 и 4.9). В прибрежной зоне, ограниченной 10-метровой изобатой, наносы состояли в основном из среднезернистых песков (фракция 0,5–0,25 мм) с включением ракушечного материала и известнякового гравия. Мористая часть полигона была занята алеврито-пелитовыми илами [Овсяный и Гуров, 2016]. Для донных наносов Лименского залива отмечалась линейная зависимость накопления мелкозернистой фракции от глубины. Величины медианного диаметра (M_d), полученные после анализа кумулятивных кривых, изменялись от 0,13 для илистых проб до 1,67 для гравийно-песчаных наносов. Включения крупных раковин и ракушечного детрита вносили существенные изменения в величину M_d особенно в пробах с повышенным содержанием мелкозернистого материала. [Овсяный и Гуров, 2016]

Сведения о сборе материала и общая характеристика донных наносов залива представлены в Таблице 4.3.

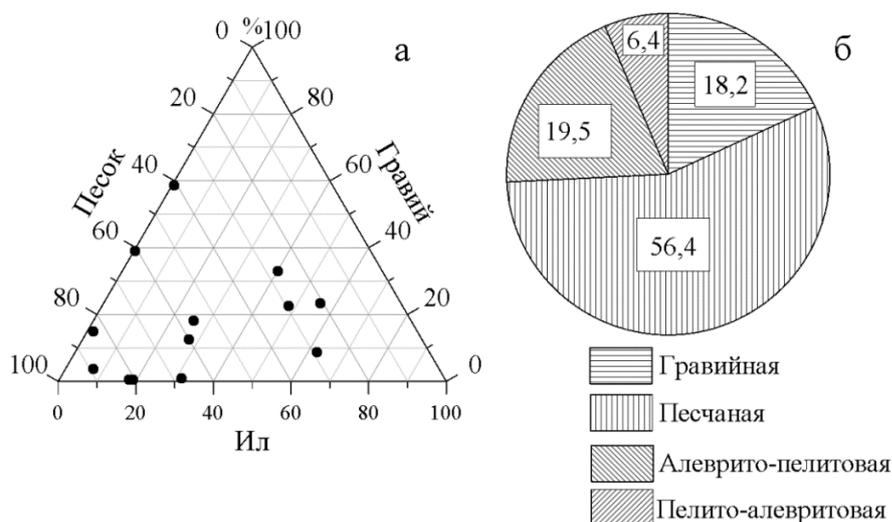


Рисунок 4.8 – Трехкомпонентная (а) и круговая (б) диаграммы фракционного состава донных наносов

Таблица 4.3 – Общая характеристика поверхностного слоя (0–5 см) донных наносов Лименского залива (ЮБК, пгт Кацивели; отбор проб 28–30 ноября 2012 г.) [Овсяный и Гуров, 2016]

№ Ст.	Глубина, м	Характеристика донных наносов
2	18	Ракушечник с каменной галькой (>1мм) и песком
3	41	Темно-серый ил с раковинами и детритом
5	39,5	Темно-серый ил с раковинами (~20%) и детритом
6	19,5	Темно-серый песок с раковинами и детритом
7	5	Серый песок с раковинами и раковинным детритом
9	12,5	Темно-серый гравий с песком и раковинный детритом
10	25	Мелкозернистый серый песок с раковинами (>20%) и детритом
11	37	Раковинный гравий (>40%) с серым жидким илом
19	38	Темно-серый илистый песок с раковинным детритом
20	21,5	Темно-серый песок с раковинным детритом
21	13,5	Серый песок с раковинами и раковинным детритом
22	7	Темно-серый песок с раковинами и детритом

Алеврито-пелитовая взвесь, образующаяся в результате интенсивного размыва местных глинистых берегов и волновой переработки поверхностного слоя наносов, переносилась в глубоководную зону. Как показал модельный эксперимент, перенос сгонными потоками мелкозернистой части наносов на большие глубины в направлении от берега происходит при преобладании ветров юго-западного направления [Алексеев, 2013; Овсяный и Гуров, 2016].

Особенности распределения алеврито-пелитовой, песчаной и гравийной фракций на полигоне представлены на Рисунке 4.9. Как видно из рисунка, мелкодисперсные алеврито-пелитовые фракции были локализованы в мористой части полигона.

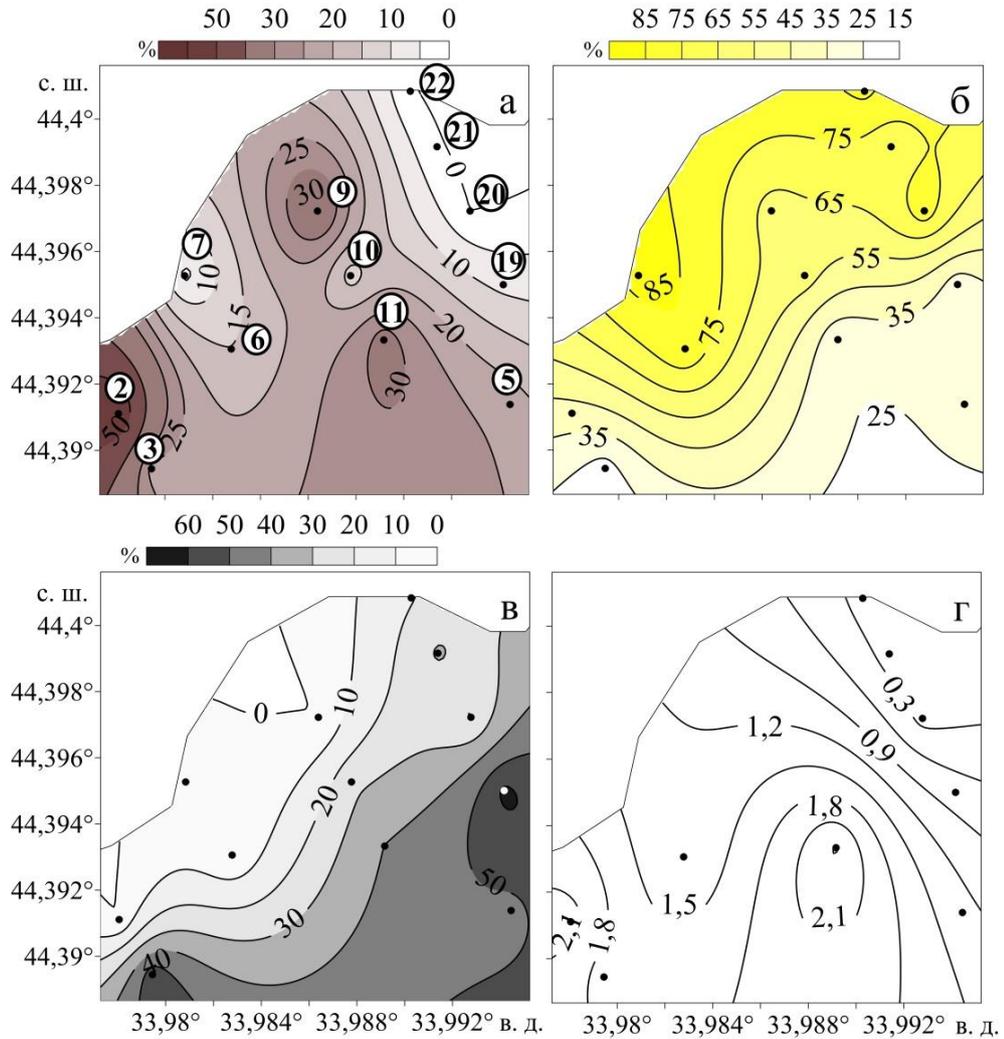


Рисунок 4.9 – Пространственное распределение гравийной (а), песчаной (б), алеврито-пелитовой (в) фракций и среднего диаметра частиц, мм (г) в поверхностном слое донных наносов; цифрами в кружечках показаны номера станций отбора проб

По-видимому, наиболее значимой причиной столь высокой степени неоднородности донных наносов являются постоянные изменения условий седиментации взвешенного вещества, определяемые сезонными колебаниями метеорологических параметров и гидродинамикой вод. Основным источником донных наносов, очевидно, являются взвешенные наносы, которые образуются в результате абразии берегов. Продукционная деятельность бентоса также вносит значимый вклад. При этом проявляется его биологическая роль в седиментогенезе, на что указывало присутствие раковинного материала в наносах на всех станциях.

Указанные предположения хорошо согласуются с результатами [Наседкин и др., 2005, 2009], где с использованием метода седиментационных ловушек для акватории Лименского залива были выделены основные источники поступления вещества – привнесение минеральной составляющей вследствие ветровой эрозии и абразии берегов, а также продуцирование в море живыми организмами [Овсяный и Гуров, 2016].

Полученные данные гранулометрического состава будут адаптированы для использования в модели *XBeach* в качестве начальных значений состава наноса в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок – среднезернистый песок – мелкозернистый песок), распределенных с различным соотношением объемных концентраций на различных участках исследуемой акватории (Таблица 4.4). Основные используемые параметры наноса, такие как средняя объемная концентрация каждой фракции, медианный диаметр и относительный средний диаметр наноса, рассчитывались по соответствующим формулам (3.18) – (3.21), описанным в пункте 3.2.2.

Таблица 4.4 – Основные параметры гранулометрического состава донных наносов Лименского залива, которые будут использованы в модели *XBeach*

Фракция	D90, мм	D50, мм
1) Мелкий гравий – крупнозернистый песок	1,5	0,8
2) среднезернистый песок	0,70	0,45
3) мелкозернистый песок	0,25	0,14

4.3 Балаклавская бухта

Расположение станций отбора проб в Балаклавской бухте показано на (Рисунок 4.10, а). Используемая в работе схема станций позволила провести условное районирование акватории, имеющее направление с севера на юг

(Рисунок 4.10, б). Районирование проводилось на примере станций отбора проб в 2005 г. [Гуров и др., 2015].

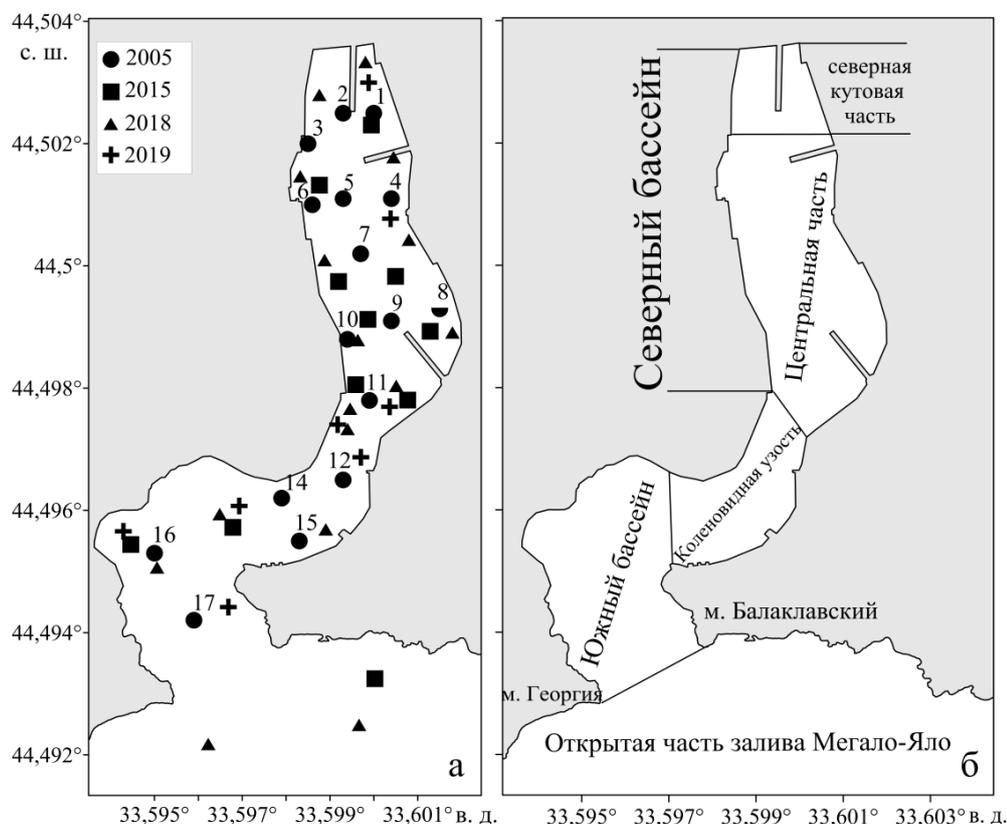


Рисунок 4.10 – Схема расположения станций отбора проб донных наносов (а) и районирование Балаклавской бухты (б)

В северной, кутовой и наиболее мелководной части расположены ст. 1, 2, 3, в центральной – ст. 4–10. Далее следует наиболее узкая часть Балаклавской бухты (коленовидная узость), в пределах которой находятся ст. 11–14, в южной части и на выходе из бухты – ст. 16 и 17 [Гуров и др., 2015].

Особенности пространственного распределения основных фракций донных наносов показаны на Рисунке 4.11.

Большая часть проб была представлена пелито-алевритовыми и алеврито-пелитовыми илами (Рисунок 4.12). В среднем по фракциям доля пелито-алевритовых илов составила 43%, а алеврито-пелитовых – 24%. Максимальные концентрации илистого материала отмечались в донных наносах северного

бассейна, а именно в его ктовой северо-западной части (98–100%) (Рисунок 4.12, в).

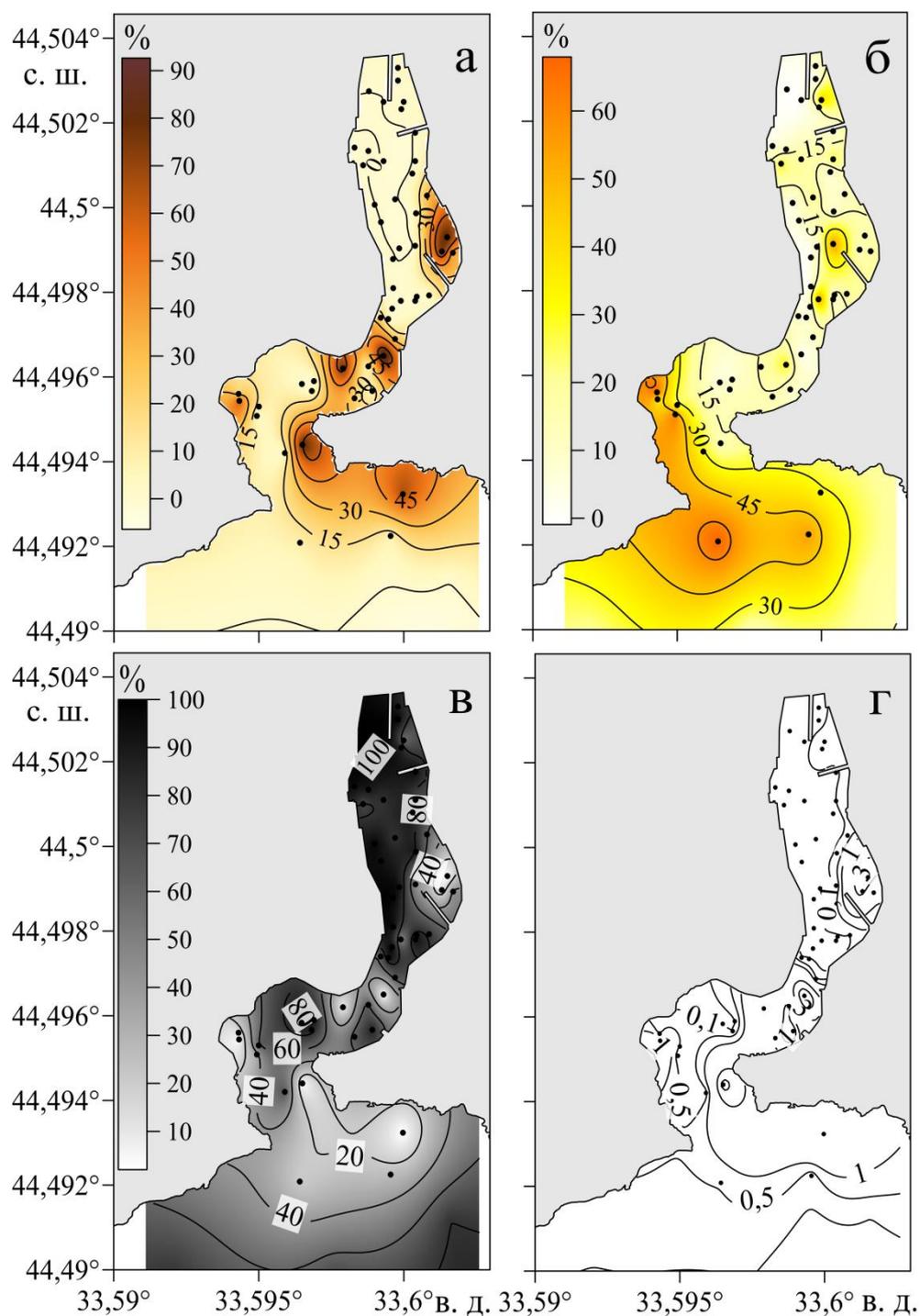


Рисунок 4.11 – Пространственное распределение глинистой (а), песчаной (б), илистой (в) фракций и среднего диаметра частиц, мм (Г) в поверхностном слое донных наносов Балаклавской бухты в 2005–2019 гг.

Накопление илистого материала определялось изолированностью этой части бухты от волнения открытого моря, слабыми гидродинамическими процессами и поступлением терригенного материала с ливневыми и коммунальными стоками. Повышенное содержание илистого материала в донных наносах южного бассейна и на выходе из бухты (Рисунок 4.11, в) было связано с особенностями рельефа дна, а именно с увеличением глубины. Пробы с преобладанием мелкодисперсного материала отличались хорошей сортировкой (1,5), а среднее значение медианного диаметра (M_d) для фракций составило 0,11 мм [Гуров и др., 2015].

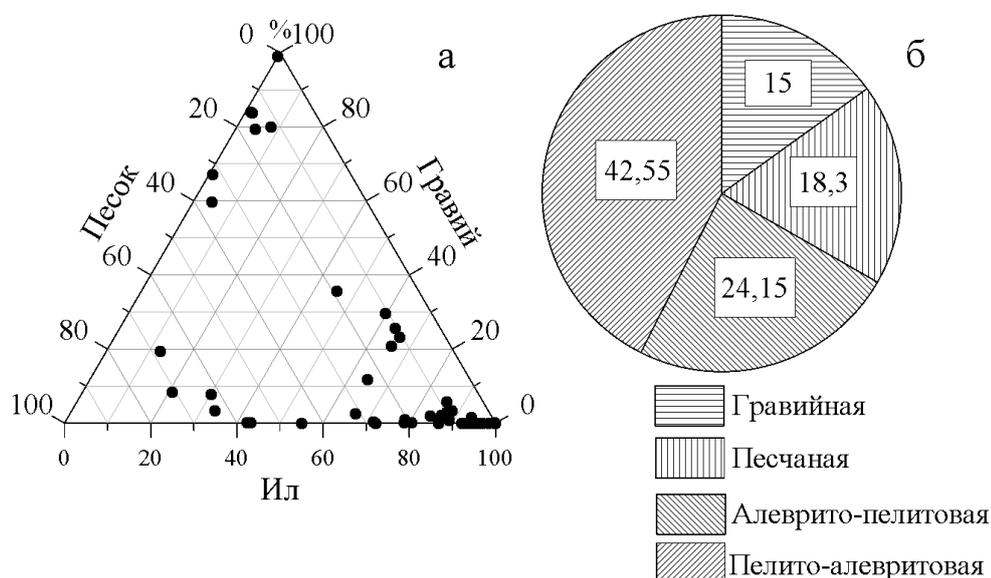


Рисунок 4.12 – Трехкомпонентная (а) и круговая (б) диаграммы фракционного состава донных наносов Балаклавской бухты, 2005–2019 гг.

Перемещаясь в центральную часть, мелкодисперсные илы сменялись песчаными илами. Фракционный состав наноса на отдельных станциях отражал отношение содержания илистой фракции к песчаной как 1:1. Максимальное содержание песчаного материала отмечалось в донных наносах южного бассейна, где расположен городской пляж, а также на выходе из бухты (Рисунок 4.11, б). В этой части концентрация фракции песков достигала 60–70%. В наносах северного

бассейна бухты песчаный материал был представлен слабо (15–35%), среднее по всем пробам – 18% (Рисунок 4.12, б) [Гуров и др., 2015].

Распространение гравийной фракции с северо-востока на юго-запад в виде локальных максимумов в прибрежной части и на выходе из бухты определяется повышенным содержанием в этих районах ракушечного гравия и детрита (Рисунок 4.12, а) [Гуров и др., 2015]. Среднее значение медианного диаметра для гравийного материала составило 8,31 мм.

Полученные данные гранулометрического состава будут адаптированы для использования в модели *XBeach* в качестве начальных значений состава наноса (Таблица 4.5). Основные используемые параметры наноса рассчитывались по соответствующим формулам (3.18) – (3.21), описанным в пункте 3.2.2.

Таблица 4.5 – Основные параметры гранулометрического состава донных наносов Балаклавской бухты, которые будут использованы в модели *XBeach*

Фракция	D90, мм	D50, мм	D15, мм
Мелкий гравий – крупнозернистый песок	1,5	0,8	0,65
Среднезернистый песок	0,5	0,375	0,25
Мелкозернистый песок и алеврит	0,2	0,13	0,1

Выводы к главе 4

В четвертой главе приведен анализ современных данных гранулометрического состава донных наносов в прибрежной зоне Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты. Показаны особенности пространственного распределения различных фракций в мористой и прибрежной частях акваторий. Для береговой зоны Каламитского залива получены новейшие данные фракционного состава наносов приурезовой полосы и материала пляжей.

Установлено, что донные наносы мористой части Каламитского залива представлены ракушечным гравием с детритовым песком, а также алеврито-пелитовым и пелито-алевритовым илом. Донные наносы прибрежных районов

отличаются бóльшим разнообразием, что, скорее всего, связано с источниками их питания и с гидродинамической активностью. Показано, что в береговой зоне Каламитского залива вблизи линии уреза воды накапливается средний и мелкий гравий с примесью мелкозернистого песка. В наносах пляжей преобладает фракция 0,5–0,25 мм с включениями крупно- и мелкозернистого песка, а доля алевритового и пелитового материала составляет 0,6 %, что согласуется с литературными данными.

Донные наносы Лименского залива в прибрежной зоне были представлены среднезернистыми песками с включением ракушечного материала и известнякового гравия, а в мористой части полигона алеврито-пелитовыми илами. Установлено, что для всех проб наносов была характерна двухвершинная диаграмма содержания фракций, образованных как крупно-, так и мелкозернистыми частицами. Наибольшая доля приходилась на гравийную и песчаную фракции.

Установлено, что донные наносы Балаклавской бухты были представлены преимущественно пелито-алевритовыми и алеврито-пелитовыми илами, максимальные концентрации которых отмечались в северо-западной части северного бассейна. Распространение гравийной фракции в виде локальных максимумов вблизи берега определялось повышенным содержанием в этих районах ракушечного гравия и детрита.

На основе полученных статистических характеристик гранулометрического состава донных наносов прибрежной зоны и наносов береговой зоны для дальнейшего использования в качестве входных параметров для модели *XBeach* было выбрано три фракции: мелкозернистый гравий (фракция 2–1 мм) и крупнозернистый песок (фракция 1–0,5 мм); среднезернистый песок (фракция 0,5–0,25 мм); мелкозернистый песок (фракция 0,25–0,1 мм). Соотношения этих фракций для различных участков подводного берегового склона Каламитского залива, прибрежной зоны Лименского залива и акватории Балаклавской бухты будут выбраны с учетом данных о гранулометрическом составе донных наносов, представленных в данной главе.

Результаты исследований, представленные в четвертой главе работы, опубликованы в [Гуров и др., 2014; Гуров и др., 2015; Овсяный и Гуров, 2016; Гуров, 2018; Орехова и др., 2018; Gurov and Kotelyanets, 2018; Котельянец и др., 2019; Тихонова и др., 2019; Гуров, 2020; Котельянец и Гуров, 2020; Гуров и Фомин, 2021].

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ НАНОСОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

5.1 Каламитский залив

5.1.1 Начальные и граничные условия. Исследование штормовых изменений пространственного распределения фракций донных наносов в прибрежной и береговой зонах Каламитского залива проводилось на трех участках: северная часть пересыпи оз. Сасык, северная часть пересыпи оз. Богайлы и набережная в пгт Николаевка. Учитывая однородность рельефа в пределах исследуемых участков Каламитского залива и распределения наносов во вдольбереговом направлении, был реализован 1D вариант комплексной модели морфодинамики береговой зоны *XBeach* (полная информация о модели см. пункт 3.2.2). В качестве входных параметров использовались натурные данные о рельефе дна и гранулометрическом составе наносов, полученные в ходе выполнения мониторинговых наблюдений, осуществляемых МГИ РАН. Расчеты проводились для различных параметров сетки, профилей дна и характеристик ветрового волнения, основанных на результатах статистического анализа, полученного из данных литературных источников [Атлас волнения и ветра..., 1969, Типовые поля ветра и волнения..., 1987, Ефимов и Комаровская, 2009] для каждого участка, приведенных в пункте 2.1.2. Направление ветрового волнения в течение всего времени принималось неизменным, ориентированным вдоль профиля исследуемого подводного берегового склона.

Параметры частотного спектра JONSWAP принимались следующими: высота значительных волн $h_s = 1, 2, 3, 4$ м; пиковый период волн $\tau_p = 6, 8$ и 10 с; параметр пиковатости спектра = 3,3; показатель степени углового рассеивания волн $l = 10$. Предполагалось, что для исследуемых районов $\tau_p = 6$ с соответствует развивающемуся волнению, $\tau_p = 8$ с – развитому волнению, а $\tau_p = 10$ с – волнам зыби. Все остальные настройки принимались по умолчанию, за исключением параметров *avalanching*. Параметры (*dryslp*) и (*wetslp*) имели значения 0,1.

5.1.2 Район пгт Николаевка. Повышенный интерес к исследованию береговой зоны в районе пгт Николаевка, определяется подверженностью этого района интенсивному негативному воздействию экзогеодинамических процессов. Наиболее остро это воздействие проявляется в связи с активным и необоснованным вмешательством человека в природные процессы в последнее десятилетие. Район пгт Николаевка отличается прямолинейным характером береговой линии и расположением изобат параллельно берегу [Гуров и др., 2016].

Расчетная область представляла собой профиль дна, построенный на основе данных промеров и распределения глубин, полученных с навигационной карты. Длина профиля составляла 500 м. Количество узлов сетки, в зависимости от решаемых задач, задавалось равным 250 и 500 [Гуров и др., 2016]. Основным изменяемым параметром частотного спектра JONSWAP была высота значительных волн $h_s = 1, 2, 3, 4$ м.

В качестве условия на берегу использовалась неразмываемая стенка, расположенная на удалении 6,5 м от уреза воды. Применение этого условия обусловлено реальной ситуацией, наблюдаемой в исследуемом районе, где в качестве береговой границы выступают элементы разрушенной набережной [Гуров и др., 2016].

Моделирование морфодинамики подводного берегового склона проводилось на период времени 24 часа. Особенностью моделирования являлось использование двух фракций донных наносов при разном положении границы раздела между ними на профиле (Рисунок 5.1). Каждая фракция определялась своими параметрами крупности (Таблица 5.1), включающими медианный диаметр (D50) и дополнительный параметр D90. Используемые величины соответствовали результатам анализа гранулометрического состава донных наносов береговой зоны, представленным в параграфе 4.1.

В первом случае решались две задачи: эксперимент 1.1 и 1.2 (Таблица 5.1). Для этого, в качестве параметров дна задавались две комбинации фракционного состава наносов, граница раздела которых проходила посередине профиля (Рисунок 5.1, а). Крупность донных наносов уменьшалась по профилю, таким

образом: в эксперименте 1.1 использовались комбинация крупнозернистые (1–0,5 мм) и среднезернистые (0,5–0,3 мм) пески, а в эксперименте 1.2 – среднезернистые и мелкозернистые (0,3–0,1 мм). Предложенные начальные условия позволили оценить динамику донных наносов, состоящих из различных размерных фракций, подчеркнуть особенности перераспределения песчаного материала различной крупности. В качестве входных данных задавалась различная высота волнения, изменяемая в диапазоне 1–3 м. Количество ячеек сети задавалось равным 250, а шаг сетки составил 2 м [Гуров и др., 2016].

Таблица 5.1 – Основные параметры гранулометрического состава донных наносов исследуемого участка

№ эксп.	Фракция	D90, мм	D50, мм
1.1	1) Крупнозернистый песок	1,5	0,5
	2) Среднезернистый песок	0,5	0,3
1.2	1) Среднезернистый песок	0,5	0,3
	2) Мелкозернистый песок	0,3	0,1
2.1–2.3	1) Крупнозернистый песок	1,5	0,5
	2) Среднезернистый песок	0,5	0,3

Во втором случае (эксперименты 2.1–2.3 в Таблице 5.1) использовалась одна комбинация фракционного состава наносов, а именно крупнозернистый (1,5–0,5 мм) и среднезернистый (0,5–0,3 мм) песок. Данный состав наносов береговой зоны соответствует южному участку пгт Николаевка. Крупность частиц, как и в первом случае, уменьшалась по мере удаления от берега. Кроме того, использовалось несколько границ раздела фракций наносов, расположенных на разной глубине. В результате было реализовано три эксперимента. Для первого (эксперимент 2.1) граница раздела фракций проходила на глубине 3 м, для второго (эксперимент 2.2) на 3,5 м, а для третьего (эксперимент 2.3) на 4 м (Рисунок 5.1, б). Предложенные начальные условия структуры дна позволили

оценить влияние пространственного расположения границы раздела фракций по крупности на их динамику. Было изменено число вариаций интенсивности ветрового волнения (максимальные высоты волн составили 2 и 4 м). Количество ячеек сетки было увеличено до 500, а шаг сетки составил 1 м. Выбранная детализация сетки позволила уточнить пространственные неоднородности, наблюдаемые на исследуемом участке [Гуров и др., 2016].

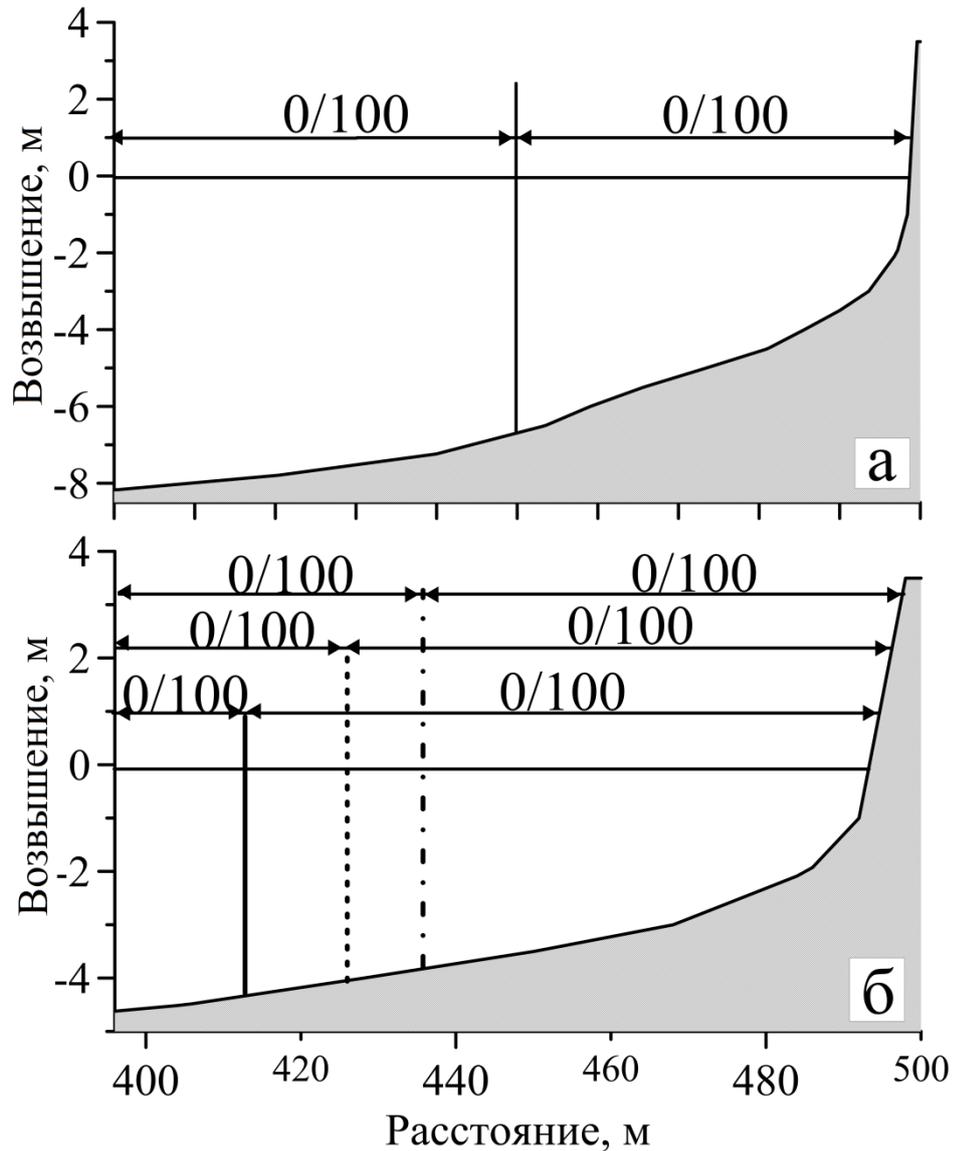


Рисунок 5.1 – Профиль дна исследуемой области и объемные соотношения фракций наносов в начальный момент времени: (а) граница раздела посередине профиля; (б) границы раздела на 3, 3,5 и 4 м

Для начала рассмотрим особенности перераспределения фракций крупно-среднезернистого песка, когда граница раздела материала проведена посередине профиля. Полученные результаты пространственного распределения гранулометрических фракций на границе раздела показали, что изменение объемных концентраций наносов для профиля, сложенного материалом крупной и средней зернистости на глубинах более 6 м отмечаются только под воздействием волнения с $h_s = 3$ м. Перемещение материала минимальное и проявляется только вблизи границы смены фракций (Рисунок 5.2). Масштаб этих изменений для крупнозернистого материала ограничивался 3%. Объем перемещения фракции (0,5–0,3 мм) в зону распространения крупнозернистых песков был минимален.

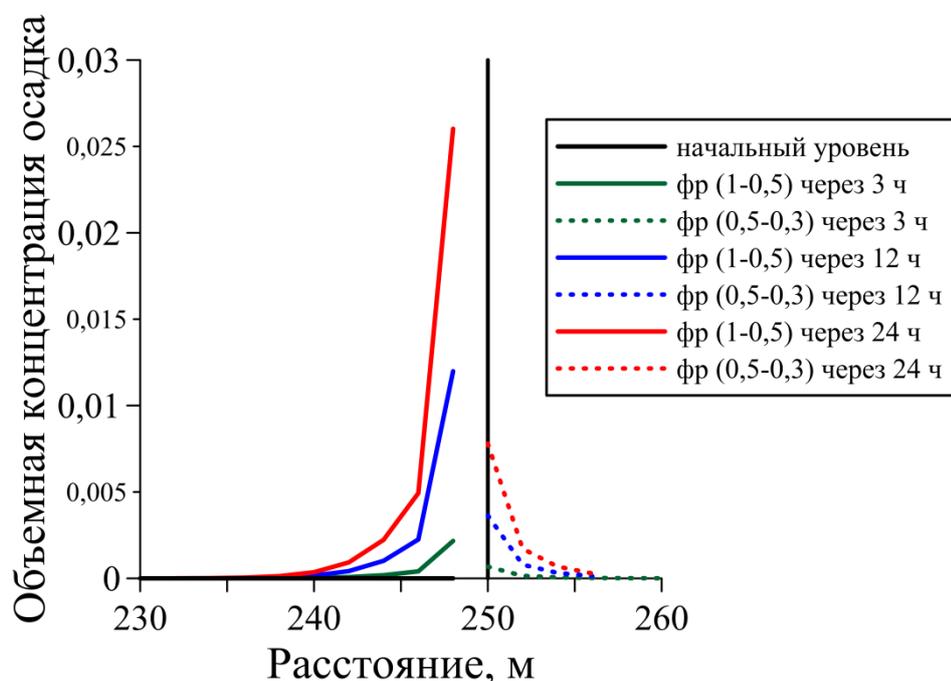


Рисунок 5.2 – Распределение объемных концентраций крупно-среднезернистого материала (эксперимент 1.2), $H_{\text{макс}} = 3$ м

Достижение квазиравновесного профиля, сложенного крупно-среднезернистым песком, изменялось в зависимости от интенсивности волнения. Для интенсивного волнения с $h_s = 2\text{--}3$ м профиль достигал своего равновесного состояния через 12–12,5 часов. Под воздействием более слабого волнения равновесие профиля отмечалось через 19,5 часов.

Для профиля, сложенного средне-мелкозернистым песком перераспределение фракций происходило в еще меньших масштабах, ограниченных 0,6%. Таким образом, время достижения квазиравновесного состояния для профиля достигалось в более короткие сроки. Для интенсивного волнения ($h_s = 2-3$ м) профиль стабилизировался через 10,5–10 часов, а для слабого волнения через 17 часов.

Результаты, полученные для второй серии экспериментов, показали, что в зависимости от расположения границы раздела фракций изменяются масштабы перемещения фракций наносов, а также время установления равновесного профиля. Существенную роль также оказало увеличение крупности материала до предельных значений песчаной фракции. Максимальные величины перемещения фракций отмечались в случаях, когда граница их раздела проходила на глубинах 3 и 3,5 метра. Наблюдаемое перемещение среднезернистого материала к берегу, а крупнозернистого в мористую часть на границе раздела достигало 30% от объемной доли каждой фракции. Таким же образом изменялся осредненный параметр D_{50} , характеризующий среднюю крупность наносов. Масштабы характерных изменений исследуемых параметров ограничивались 25-ти метровой зоной (Рисунок 5.3, а, в).

Для численного эксперимента с границей раздела фракций на глубине 4 м, масштабы перераспределения фракций сократились практически вдвое, а величины объемной доли фракций изменялись в пределах 20% (Рисунок 5.3, б, г). Квазиравновесный профиль устанавливался в приведенных экспериментах за период не более 8 часов.

Таким образом, полученные результаты показали, что на интенсивность перемещения песчаных фракций по монотонному профилю значительное влияние оказывает как интенсивность волнения, так и крупность материала и расположение границы его раздела. В результате воздействия волнения средней интенсивности ($h_s = 1-2$ м) перемещение песчаного материала минимально. Показано, что максимальные величины перераспределения фракций отмечались

под воздействием интенсивного волнения $h_s = 3$ м, преобладало перемещение крупнозернистых фракций в мористую часть профиля.

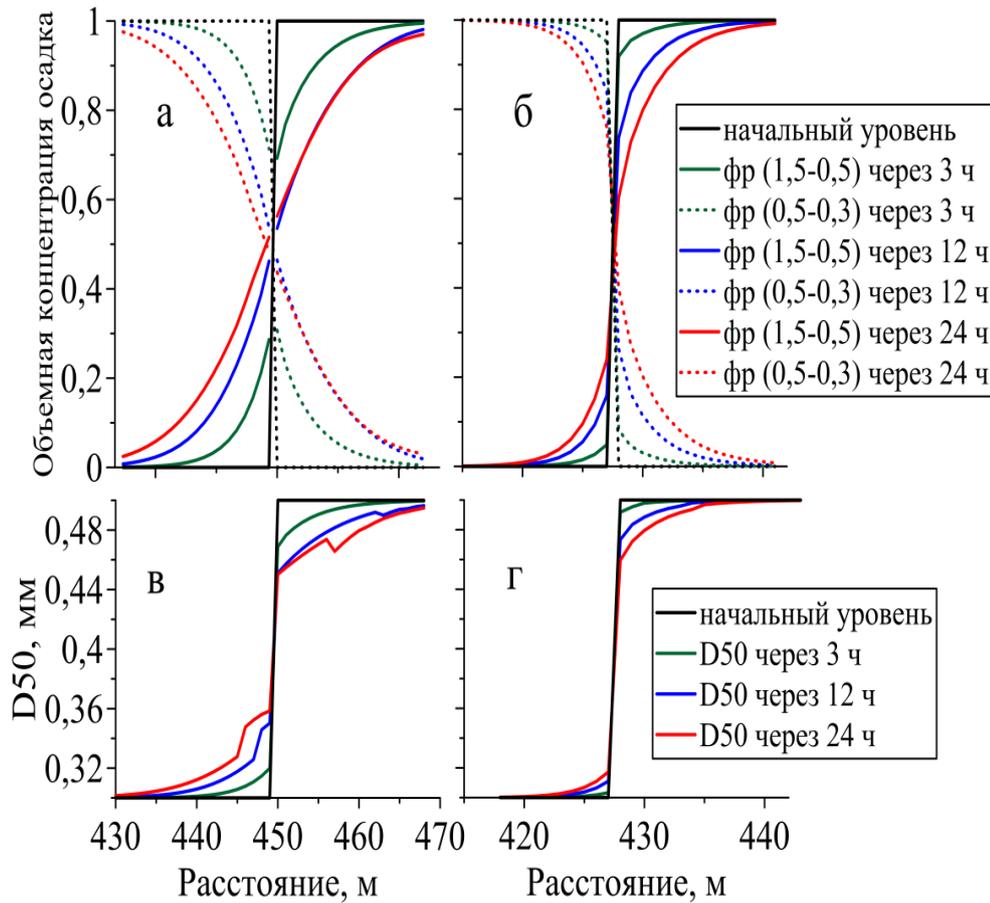


Рисунок 5.3 – Распределение объемных концентраций наносов и среднего диаметра частиц (D50) при: а, в) границе раздела фракций на глубине 3 м; б, г) границе раздела фракций на глубине 4 м.

Анализ результатов математического моделирования показал, что основные морфодинамические процессы происходили в пределах 25-ти метровой зоны ограниченной изобатой 2,5 м [Гуров и др., 2016].

Расчетные профили подводного берегового склона, сформированные разными по гранулометрическому составу комбинациями, при одной и той же интенсивности волнения отличаются. При этом независимо от шага расчетной сетки, положения границ раздела фракций и интенсивности волнения, высота образованного подводного бара составляла 0,25–0,3 м. Значения деформаций

уровня дна (Δz_b), полученные для первой серии экспериментов (эксперименты 1.1 и 1.2), показали, что при воздействии слабого волнения ($h_s = 1$ м) эрозионно-аккумулятивные процессы были минимальны. В результате второй серии экспериментов (эксперименты 2.1–2.3) было установлено, что при воздействии волнения с ($h_s = 2$ м) наибольшие морфодинамические изменения подводного берегового склона наблюдались, когда граница раздела фракций проходила на глубине 3,5 м, а наименьшие отмечались для эксперимента 2.3 с границей раздела на 4 м [Гуров и др., 2016].

Время достижения квазиравновесного профиля дна изменялось с увеличением интенсивности волнения и крупности наносов. Так, установление равновесия для крупнозернистого песчаного профиля достигалось за 12 ч при $h_s = 2$ м и за 19,5 при $h_s = 1$ м. Для профиля, сложенного среднезернистым песком установление равновесного профиля достигалось за 10 ч.

Результаты выполненных экспериментов показали, что при смещении границы раздела фракций на 1 м мористей ширина зоны перераспределения материала уменьшалась на 10%, а при смещении границы раздела за пределы изобаты 6 м масштабы перераспределения фракций не превышали 1% от их начального распределения.

Проводимые в районе пгт Николаевка берегоукрепительные работы, направленные на укрепление берегов путем строительства откосно-ступенчатой набережной, привели к тому, что пляжи лишились источника питания терригенным материалом. Это привело к отступанию береговой линии и усилению абразии. В результате, под воздействием волн любого направления, и особенно интенсивно под воздействием западного и юго-западного волнения происходят подмыв и подсечка бетонных конструкций ступеней.

Полученные результаты показали важную роль экзогеодинамических процессов в исследуемом районе. Учет особенностей протекания этих процессов может быть использован при планировании мер, направленных на рациональное использование ресурсов береговой зоны пгт Николаевка [Гуров и др., 2016].

5.1.3 Район пересыпи оз. Сасык. Следующий участок, выбранный в акватории Каламитского залива для исследования, находится в районе северной части пересыпи оз. Сасык и простирается на 600 метров вдоль берега и на 500 метров в сторону моря.

Антропогенное воздействие, в том числе строительство дамбы в течение XX века, оказывали значительное влияние на естественную динамику наносов в Каламитском заливе. В результате, северная часть залива стала испытывать ограничения в поставках наносов. Сезонные изменения волновых параметров определяют формирование зимних и летних профилей в прибрежной зоне. Положение береговой линии в исследуемой области на протяжении последних десятилетий является довольно стабильным.

Использовался 1D вариант модели *XBeach* с шагом 1 м. Все расчеты проводились в течение штормового периода составляющего около 48 часов. Основным изменяемым параметром частотного спектра JONSWAP был пиковый период волн $\tau_p = 6, 8$ и 10 с. Высота значительных волн $h_s = 2$ м. В рамках адаптации модели к области Каламитского залива приближение летнего профиля использовалось в качестве исходного профиля для численного моделирования (Рисунок 5.4). Были рассмотрены две фракции наносов (Таблица 5.2).

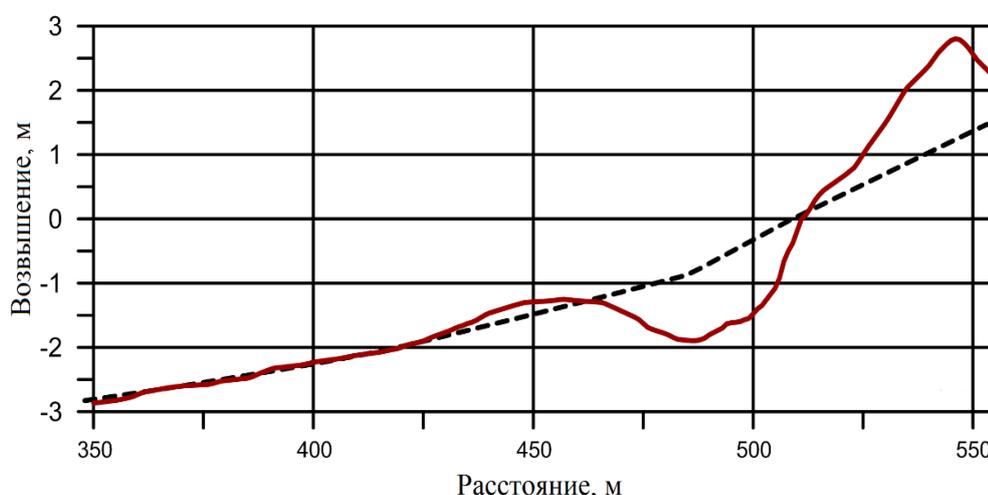


Рисунок 5.4 – Профиль пляжа и подводного берегового склона в северной части пересыпи оз. Сасык (красная линия) и его аппроксимация (пунктирная линия)

Таблица 5.2 – Основные параметры гранулометрического состава донных наносов исследуемого участка

Фракция	D90, мм	D50, мм
1) Мелкий гравий – крупнозернистый песок	1,370	0,635
2) Мелкозернистый песок	0,175	0,115

Расчеты проводились для двух типов начального состава дна (BC1 и BC2):

$$\text{BC1: } p_1(x,z,0) = 0.5 \text{ для } 0 \leq x \leq L;$$

$$p_2(x,z,0) = 0.5 \text{ для } 0 \leq x \leq L.$$

$$\text{BC2: } p_1(x,z,0) = 0.2 \text{ для } 0 \leq x \leq L_1 \text{ и } p_1(x,z,0) = 0.8 \text{ для } L_1 < x \leq L ;$$

$$p_2(x,z,0) = 0.8 \text{ для } 0 \leq x \leq L_1 \text{ и } p_2(x,z,0) = 0.2 \text{ для } L_1 < x \leq L$$

где $p_1(x,z,0)$ – объемная концентрация для крупнозернистой фракции в начальный момент времени;

$p_2(x,z,0)$ – объемная концентрация для мелкозернистой фракции в начальный момент времени;

x – широтная координата;

z – вертикальная координата;

$L = 555$ м и $L_1 = 489$ м – расчетные длины профиля.

Профиль BC1 (Рисунок 5.5, а) характеризовался однородностью гранулометрического состава материала. По всей длине разреза наносы состояли на 50% из крупнозернистого материала и на 50% из мелкозернистого. Представленное соотношение фракций было выбрано для того, чтобы подчеркнуть общую картину рассматриваемых процессов перераспределения песчаного материала на данном участке береговой зоны. Используемое для профиля BC1 начальное распределение гранулометрических фракций встречается в природе крайне редко. Однообразие гранулометрического состава донного материала такого рода отмечается в основном для пляжей, созданных искусственно, с применением метода подсыпки.

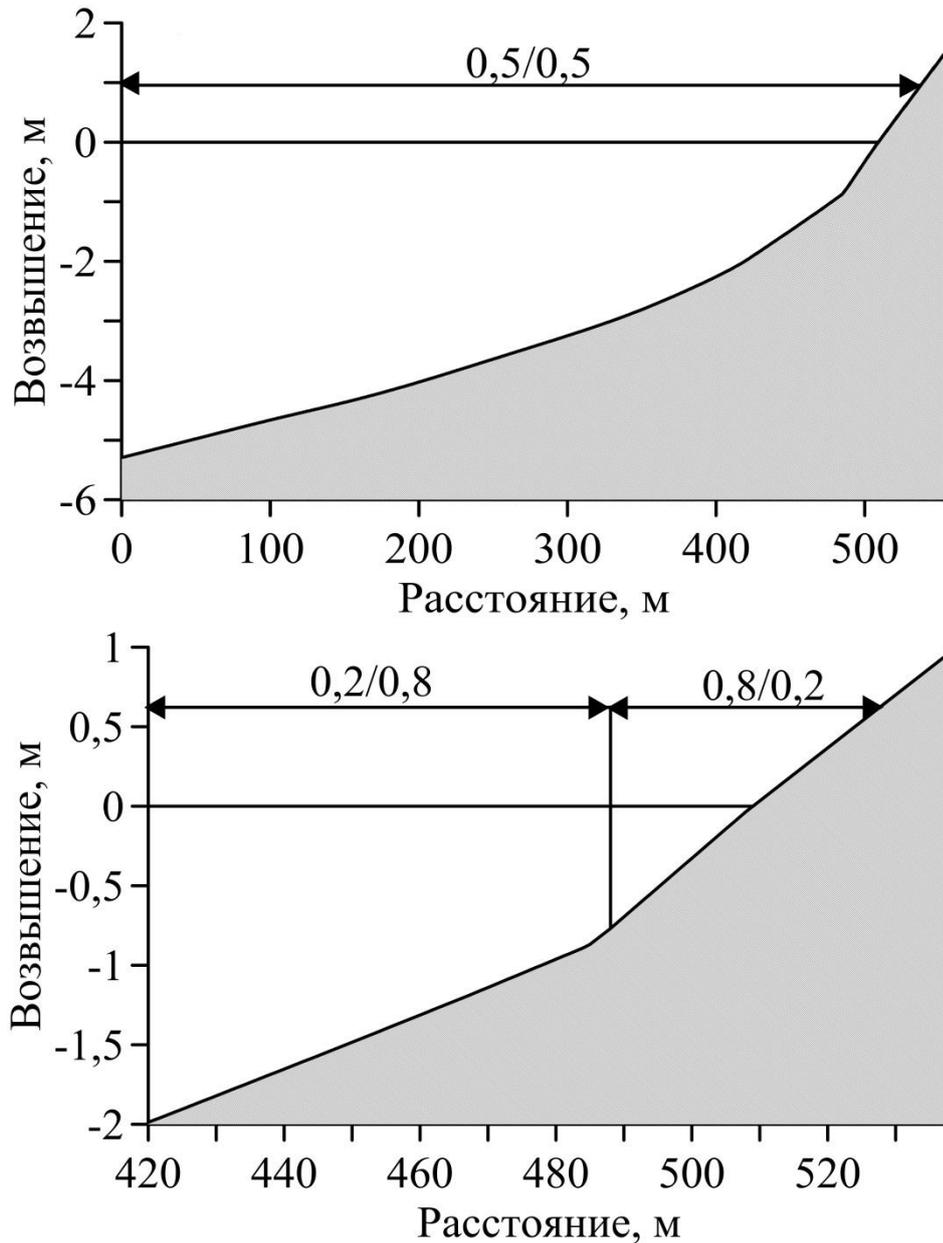


Рисунок 5.5 – Профиль рельефа исследуемой области и объемные соотношения фракций наносов в начальный момент времени: а) для профиля ВС1; б) для профиля ВС2

Профиль ВС2 (Рисунок 5.5, б) представлял собой разрез, состоящий из разных по крупности наносов, и разделялся на две области. Первая область включала пляж и примыкающую полосу подводного склона шириной 25 м. Осадок здесь был представлен бикомпонентной смесью, состоящей на 80% из крупного материала и на 20% из мелкого. Вторая область охватывала оставшуюся часть поверхности дна. Бикомпонентная смесь представляла собой композицию

из 20% крупного и 80% мелкого материала. Выбранное соотношение наносов соответствовало реальным условиям и было основано на данных мониторинговых наблюдений, описанных в параграфе 4.1.

Период волны и начальное разделение фракций использовались как два входных параметра, которые варьировались в численных экспериментах. Исследовались эволюция профиля дна и перераспределения гранулометрических фракций в прибрежной зоне для шести сценариев. Далее будут проиллюстрированы результаты экспериментов для периода волны 8 с, так все остальные результаты были качественно подобны.

Эволюция профиля береговой зоны для всех типов используемых волновых условий и размерностей наносов приводило к эрозионному разрушению пляжей и выполаживанию подводного склона в приурезовой полосе. Размываемый материал перемещался в мористую часть прибрежной зоны и накапливался, образуя подводный бар. С увеличением периода волны расширялась полоса переформирования рельефа дна. Граница размыва пляжа сдвигалась в сторону берега, возрастали абсолютные величины деформаций дна, как в зоне размыва, так и в зоне переотложения (аккумуляции) материала. Наибольший объем движения наносов и, соответственно изменений рельефа, происходил на границе эрозии.

Скорость отступления береговой линии изменялась с течением времени. Самые высокие значения наблюдались в начале шторма, и достигали около 1 м/ч. К концу моделирования, скорость эрозионного воздействия на пляж значительно снижалась и не превышала 0,1 м/ч. Толщина эрозионного слоя увеличивалась с уменьшением величины медианного диаметра частиц наноса (D50). Ширина зоны эрозионного воздействия на надземную часть пляжа составляла около 4 м.

Перераспределение отдельных гранулометрических фракций наносов начиналось сразу с активизацией волнового воздействия. Результаты моделирования для каждого из начальных профилей дна ВС1 и ВС2 показали, что для крупнозернистого материала было характерно движение в сторону побережья, а мелкие частицы перемещались в мористую часть исследуемой области (Рисунки

5.6, а и 5.7, а). В то же время, средний диаметр гранулометрических частиц (D50) рос в зоне береговой абразии и отступления береговой линии (Рисунки 5.6, б и 5.7, б). С увеличением волнового воздействия, общая ширина полосы изменения величины D50 расширялась. Это привело к тому, что вблизи береговой линии формировалась устойчивая зона, в которой был сосредоточен крупнозернистый материал наноса. Эта зона расширялась в основном за счет смещения линии уреза воды, сдвигаемой вследствие активного размыва пляжа, и средняя крупность материала со временем увеличивалась. Результаты моделирования показали, что ширина этой зоны определялась изменением волновых параметров.

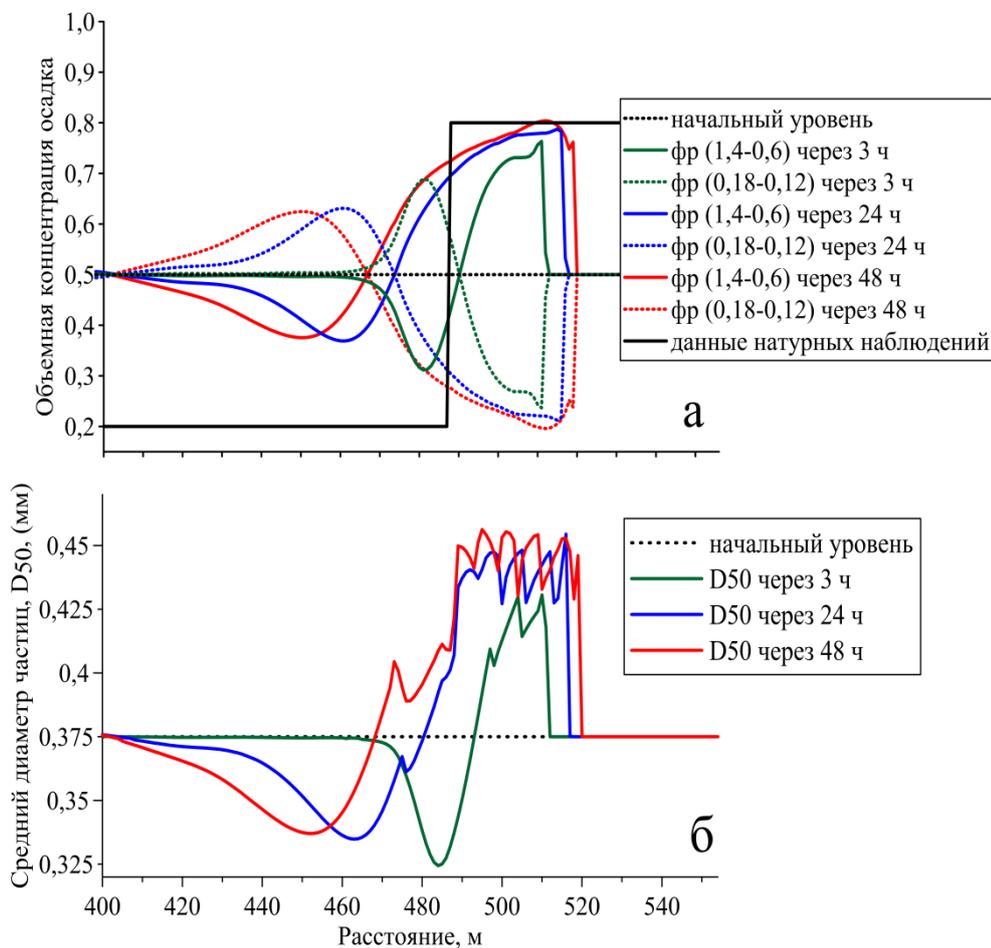


Рисунок 5.6 – Распределение объемных концентраций наносов (а); Распределение среднего диаметра частиц (D50) (б) для BC1 ($h_s = 2$ м, $\tau_p = 8$ с)

В результате, после 48 часов штормового волнения, распределение параметра D50 для профиля BC1 существенно отличалось от первоначального

(Рисунок 5.6, б). Происходило вымывание мелкозернистого материала с последующим его переотложением в мористой части профиля.

Полученные результаты показали, что на участке профиле между изобатами 1,5 и 2 м увеличивалась доля мелкозернистых частиц, что приводило к уменьшению среднего диаметра материала от 0,375 до 0,337 мм. Затем отмечалось затухание процесса дифференциации наносов и переход к первоначально заданному процентному содержанию различных фракций.

Полученные результаты были верифицированы с использованием данными натурных наблюдений (Рисунок 5.6, а, черная прямая линия). Установлено, что вблизи берега результаты натурных измерений и численных расчетов хорошо согласовались, в то время как в мористой части исследуемого профиля погрешность данных модельных расчетов достигала 50%.

Валидация результатов, полученных для профиля ВС1, была основана на данных полевых наблюдений в прибрежной зоне Каламитского залива, которые использовались в качестве начального распределение гранулометрических фракций по профилю ВС2. Предложенные начальные условия позволили оценить динамику фракций гранулометрического состава донных наносов на выбранном участке береговой зоны.

Результаты, полученные для профиля ВС2, показали, что черты распределения наносов в значительной степени сохранялись как прибрежной, так и в мористой частях профиля (Рисунок 5.7, б). Для переходной зоны смены крупности материала отмечалось монотонное уменьшение значений среднего диаметра частиц. В пределах зоны крупнозернистых фракций наносов средний размер увеличивался от 0,53 до 0,57 мм.

Дальнейшее сравнение результатов, полученных численным методом, с данными натурных наблюдений показало хорошую качественную и количественную согласованность. Погрешность данных модельных расчетов в прибрежной зоне не превышала 5%, а в мористой части профиля 10%.

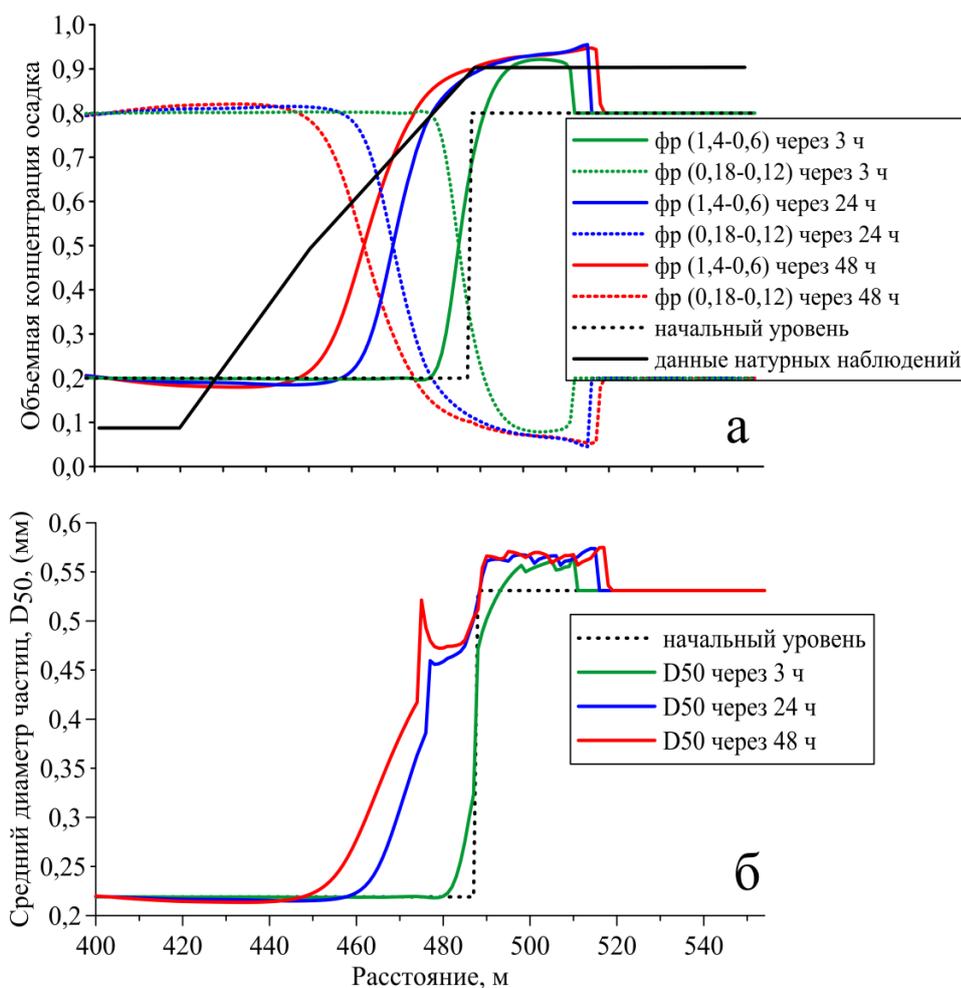


Рисунок 5.7 – Распределение объемных концентраций наносов (а); распределение среднего диаметра частиц (D_{50}) (б) для BC2 ($h_s = 2$ м, $\tau_p = 8$)

Результаты численных экспериментов показали, что эрозия пляжей и выравнивание подводного склона в береговой зоне наблюдались для всех типов используемых параметров волнения и типов распределения фракций наносов.

С увеличением продолжительности волнового воздействия изменялось количество транспортируемого материала. Это приводило к увеличению ширины зоны дифференциации материала и изменению высоты и ширины формируемого подводного бара. Ширина полосы переформирования зависела от начального распределения гранулометрических фракций наносов.

5.1.4 Район пересыпи оз. Богайлы. Третий участок, выбранный в акватории Каламитского залива для исследования динамики гранулометрических

фракций под воздействием ветрового волнения – северный участок пересыпи оз. Богайлы. Поскольку наносы в прибрежной зоне района пересыпи оз. Богайлы были представлены целым рядом крупных и мелких фракций, в работе использовались данные фактических исследований наносов Каламитского залива (см. параграф 4.1).

При проведении численных экспериментов использовались данные о рельефе и гранулометрическом состав наносов, полученные в ходе выполнения мониторинговых наблюдений, осуществляемых МГИ РАН. Общая длина профиля составляла 530 м. В начальный момент времени первые 493 м исходного профиля соответствовали ПБС, а остальные 37 м – пляжу и части верхней площадки на гребне пересыпи оз. Богайлы (Рисунок 5.8, а). Шаг расчетной сетки был 1 м. Расчеты осуществлялись на период шторма продолжительностью 48 часов [Гуров и др., 2019]. Параметры спектра JONSWAP использовались по аналогии с районом пересыпи оз. Сасык ($h_s = 2$ м, $\tau_p = 6, 8$ и 10 с).

Гранулометрический состав был задан в виде смеси из трех компонентов (Таблица 5.3), распределенных с различным соотношением объемных концентраций на различных участках профиля (Рисунок 5.8, б). В начальный момент времени распределение соотношений объемных концентраций на различных участках профиля задавалось на основе результатов натурных наблюдений, и показано до глубины 3 м, так как в мористой части профиля данный входной параметр модели не изменялся.

Таблица 5.3 – Основные параметры гранулометрического состава донных наносов исследуемого участка [Гуров и др., 2019]

Фракция	D90, мм	D50, мм	D15, мм
4) Мелкий гравий – крупный песок	1,5	0,8	0,65
5) Средний песок	0,5	0,375	0,25
6) Мелкий песок	0,2	0,15	0,1

Результаты моделирования показали, что в приурезовой полосе изменения профиля происходили в результате размыва пляжа с образованием достаточно пологого склона (Рисунок 5.9, а). Материал перемещался в мористую часть профиля, где происходило образование аккумулятивной формы.

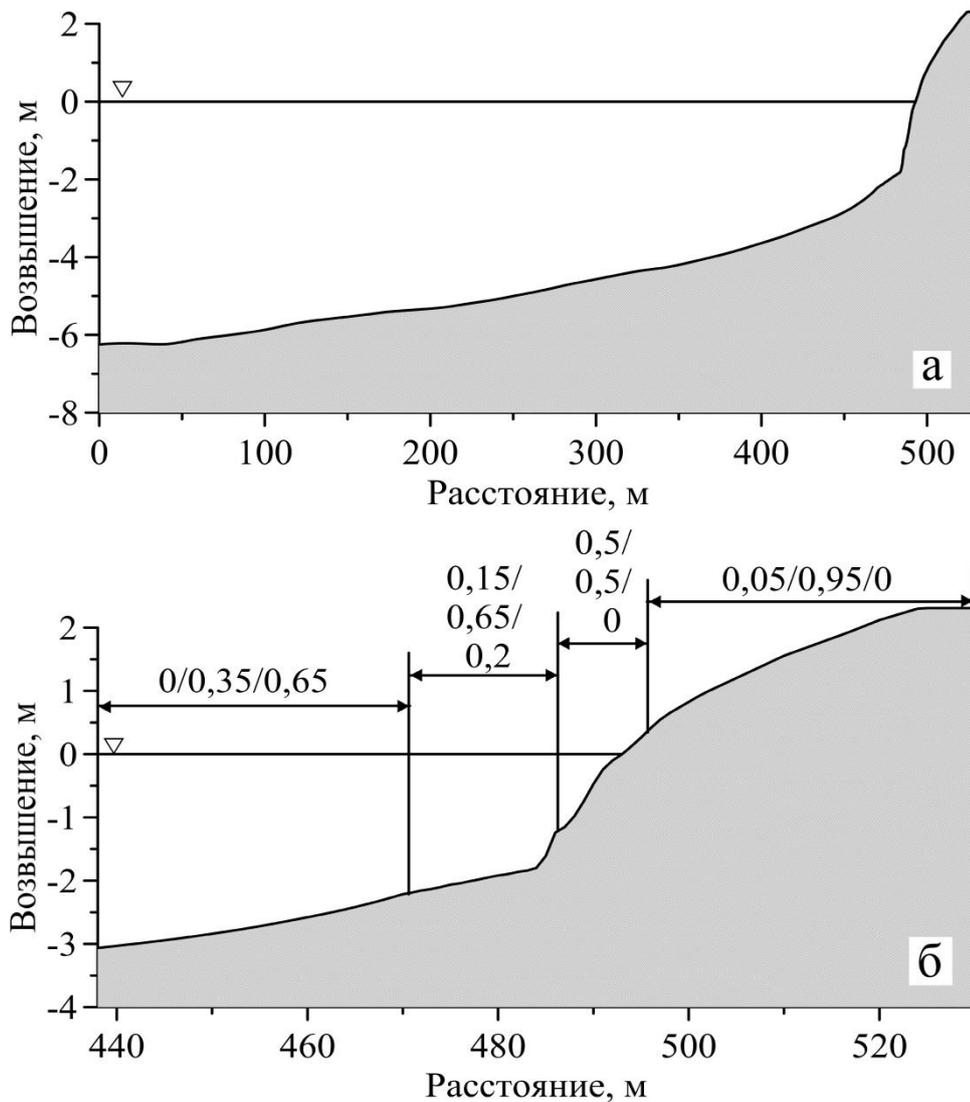


Рисунок 5.8 – Профиль береговой зоны (а) и соотношение объемных концентраций компонентов смеси на участках профиля (б) в начальный момент времени [Гуров и др., 2019]

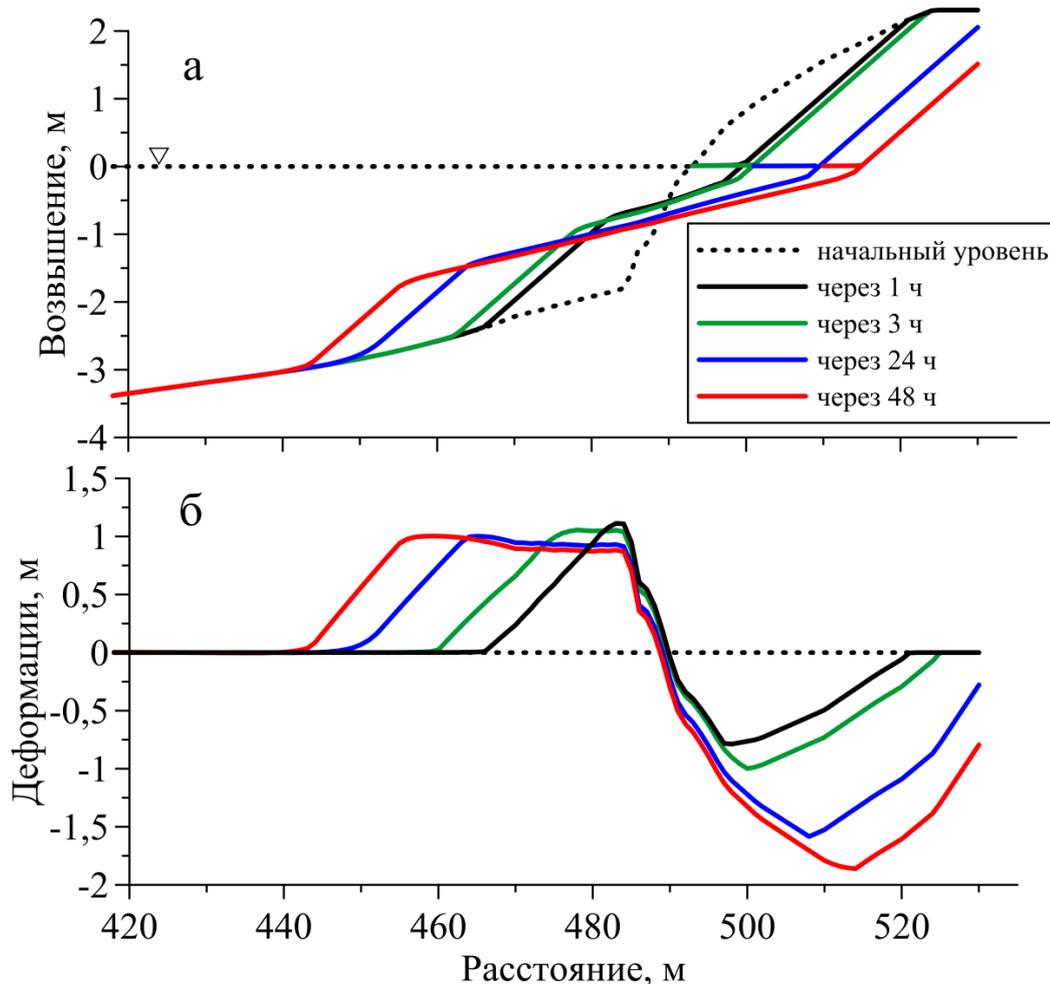


Рисунок 5.9 – Изменение профиля береговой зоны (а) и величины его деформации (б) при $h_s = 2$ м, $\tau_p = 8$ с [Гуров и др., 2019]

Период волны использовался как основной входной параметр, который изменялся в численных экспериментах. Исследовались эволюция профиля дна и перераспределения гранулометрических фракций в прибрежной зоне для трех сценариев. Временная изменчивость исследуемых характеристик рассматривалась в первые часы штормового воздействия (через 3 ч), через сутки и через двое суток штормовой активности.

По мере воздействия штормового волнения аккумулятивная форма выдвигалась в сторону моря, затем положение ее мористой границы стабилизировалось на расстоянии 50–55 м от текущего положения уреза воды. Данное расстояние характеризовало ширину полосы перемещения значительных объемов песка по нормали к берегу при заданных параметрах волн и косвенно

определяло границу блокировки вдольберегового перемещения наносов [Гуров и др., 2019].

Для крупнозернистого материала отмечалось значительное уменьшение объемной концентрации возле линии уреза – от 0,5 до 0,1, а в примыкающей зоне ПБС – от 0,15 до 0,1. Одна часть материала смещалась к берегу вслед за отступающей линией уреза, другая – в сторону моря (Рисунок 5.10, а). По мере развития шторма полоса распределения крупнозернистого материала расширялась. С ростом периода волн ширина зоны его перераспределения увеличивалась и составляла около 60 м при $T = 6$ с, 75 м при $T = 8$ с и 85 м при $T = 10$ с [Гуров и др., 2019].

Наблюдаемое увеличение доли среднезернистого песка в смеси (Рисунок 5.10, б) происходило преимущественно в результате сокращения количества мелкозернистой фракции (Рисунок 5.10, в). По мере увеличения продолжительности шторма граница больших концентраций среднезернистого материала смещалась преимущественно в мористую часть профиля. После 24 ч волнового воздействия основное изменение объемных концентраций среднезернистого материала отмечалось в пределах 40–50 метровой полосы [Гуров и др., 2019].

Мелкозернистый материал уже в первые часы штормового воздействия полностью перемещался в мористую часть профиля, где величина объемной концентрации данной фракции не изменялась в течение всего времени расчетов (Рисунок 5.10, в). Положение границы области распространения мелкозернистой фракции смещалось в сторону моря с увеличением периода волны [Гуров и др., 2019].

В результате перемещения отдельных фракций наносов происходило изменение распределения медианного диаметра частиц всей смеси (параметра D_{50}) (Рисунок 5.10, г). В приурезовой полосе отмечалось уменьшение его значения, что было обусловлено замещением крупнозернистого материала среднезернистым песком. В свою очередь, в зоне положительных деформаций профиля дна происходило увеличение D_{50} смеси в результате увеличения доли

среднезернистого песка и выноса мелкой фракции в мористую часть профиля. Резкое уменьшение величины среднего для смеси D50 при удалении от берега соответствовало зоне перехода к области накопления исключительно мелкозернистого материала [Гуров и др., 2019].

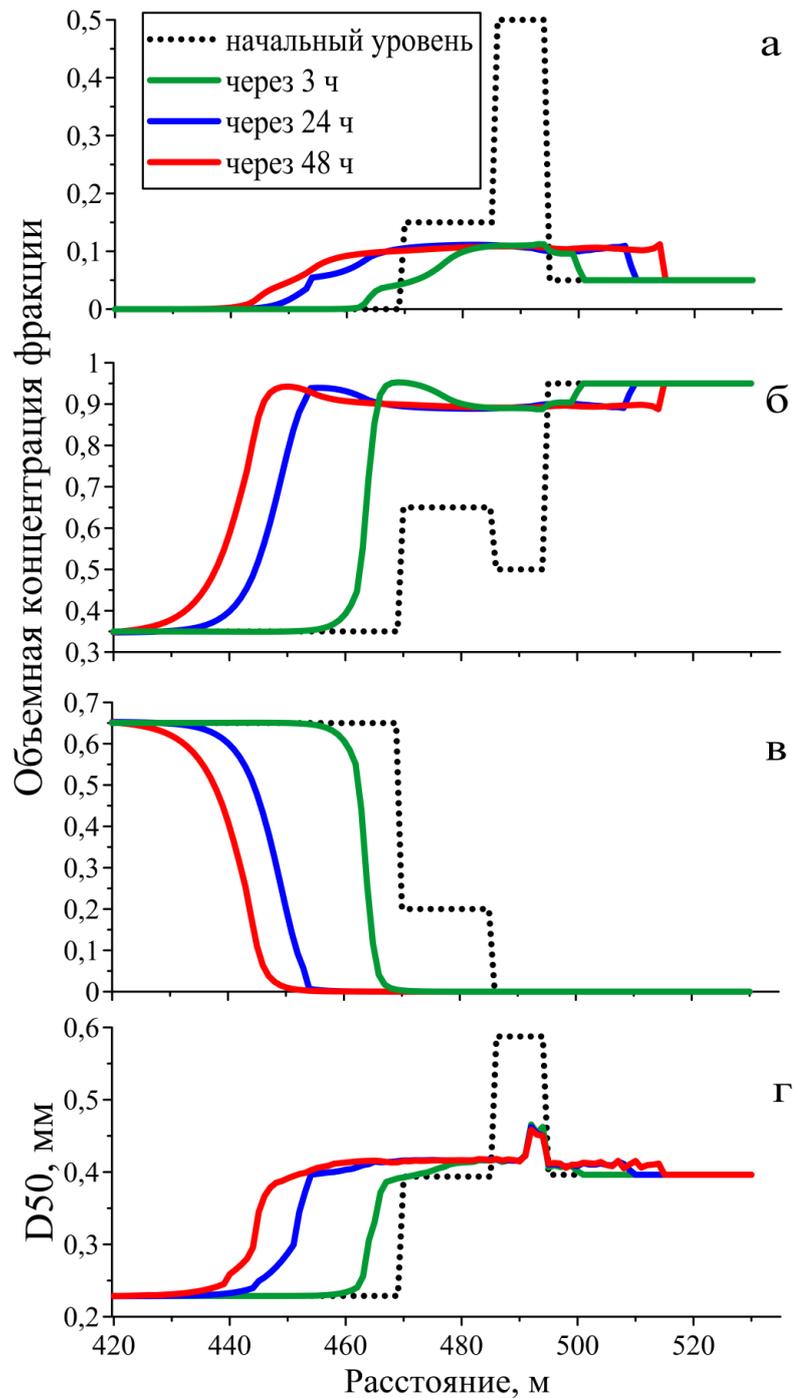


Рисунок 5.10 – Изменения объемных концентраций различных фракций: крупнозернистой (а); среднезернистой (б); мелкозернистой (в) и медианного диаметра (D50) рассчитанного для смеси фракций (г) при $h_s = 2$ м; $\tau_p = 8$ с

Полученные результаты соответствовали сформированным ранее представлениям о перемещении песчаного материала по профилю подводного берегового склона: крупнозернистый материал концентрируется вблизи линии уреза вслед за отступанием его границы, а мелкозернистый материал выносится в мористую часть профиля, где и оседает в связи с ослаблением волнового воздействия [Зенкович, 1960, 1962].

5.2 Лименский залив

Исследуемая область представляла собой акваторию размером $\sim 1,5 \times 2,5$ км и включала Лименский залив (Голубой залив) и часть прибрежной зоны Южного берега Крыма (Рисунок 5.11). Модель *XBeach* была применена в 2D варианте с постоянным шагом сетки 15 м. Расчеты проводились в виде двух экспериментов для двух типов начального распределения наносов. Более детально будут рассмотрены особенности динамики песчаного материала через 6 и 12 часов штормового воздействия. Основные результаты будут рассмотрены для южного ветрового волнения.

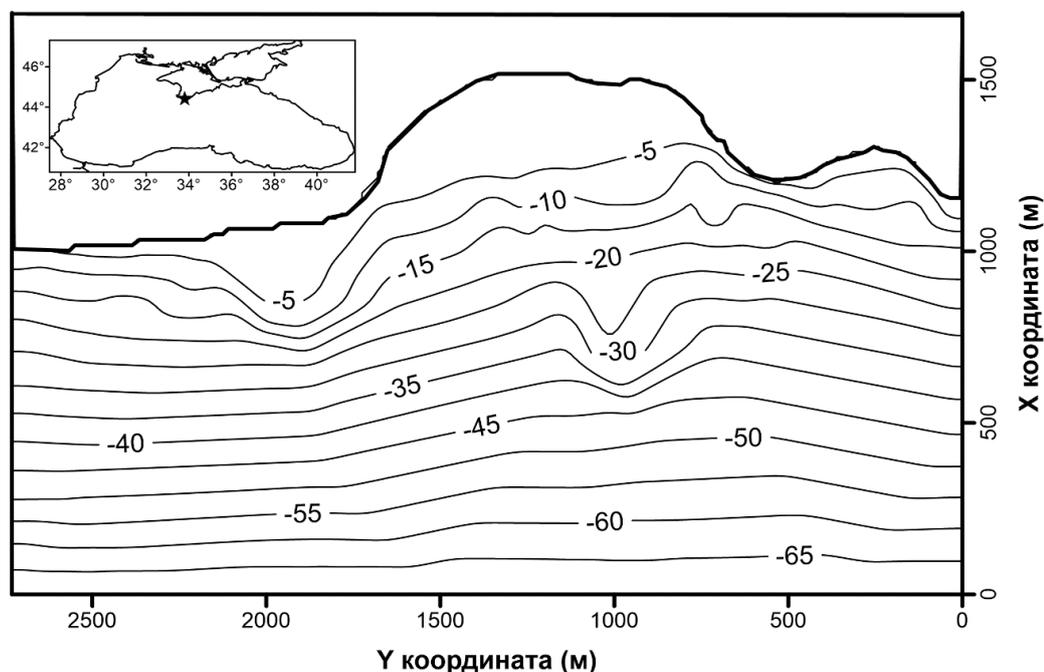


Рисунок 5.11 – Расположение района исследований и рельеф дна Лименского залива

В первом эксперименте в качестве начальных условий принималась однородная комбинация гранулометрических фракций. Содержание крупнозернистого материала составило 22%, среднезернистого – 27% и мелкозернистого – 51%. Выбранные значения удовлетворяли средним по всей акватории для каждой фракции.

Результаты моделирования показали, что крупно- и среднезернистый материал был сконцентрирован в береговой зоне и в районах, прилегающим к мысам. Максимальные значения отмечались между изобатами 5 и 7,5 м. Глубже содержание крупнозернистых фракций сокращалось, достигая в пределах изобат 10–15 м своих минимальных значений. По мере развития шторма, полоса крупнозернистого песка расширялась, изменяясь от 30 м через 6 часов до 50 м через 12 при $h_s = 3,6$ м. С увеличением продолжительности волнового воздействия изменялось количество транспортируемого материала. Это привело к тому, что ширина зоны накопления крупнозернистых фракций также увеличивалась, достигая через 12 часов 68 м при $h_s = 4,5$ м и 78 м при $h_s = 5$ м (Рисунок 5.12) Перераспределение крупно- и среднезернистого материала через 6 часов замедлялось, а долевое соотношение гранулометрических фракций существенно не изменялось.

Максимальные концентрации крупнозернистой фракции в прибрежной зоне изменялись от 0,39 при $h_s = 3,6$ м до 0,41 при $h_s = 5$ м. Если для волнения $h_s = 3,6$ м накопление крупных фракций песка отмечалось в виде локальных максимумов в прибрежной зоне, то с увеличением интенсивности волнения материал распределялся равномерно между изобатами 4–10 м.

В первые часы штормового воздействия в центральной мелководной части залива наблюдалось незначительное накопление мелкодисперсного материала. Такая картина была характерна для наименее интенсивного волнения ($h_s = 3,6$ м) из рассмотренных в данной работе. В дальнейшем, мелкозернистая фракция в процессе штормового воздействия выносилась в мористую часть акватории и накапливалась на этом участке за счет ослабления гидродинамической активности. Максимальные концентрации крупноалевритового материала для

центральной части акватории отмечались между изобатами 10–13 м, для восточной части в районе г. Кошка в пределах изобат 7–10 м, а западнее м. Кикинеиз в пределах глубин 9–11 м (Рисунок 5.13).

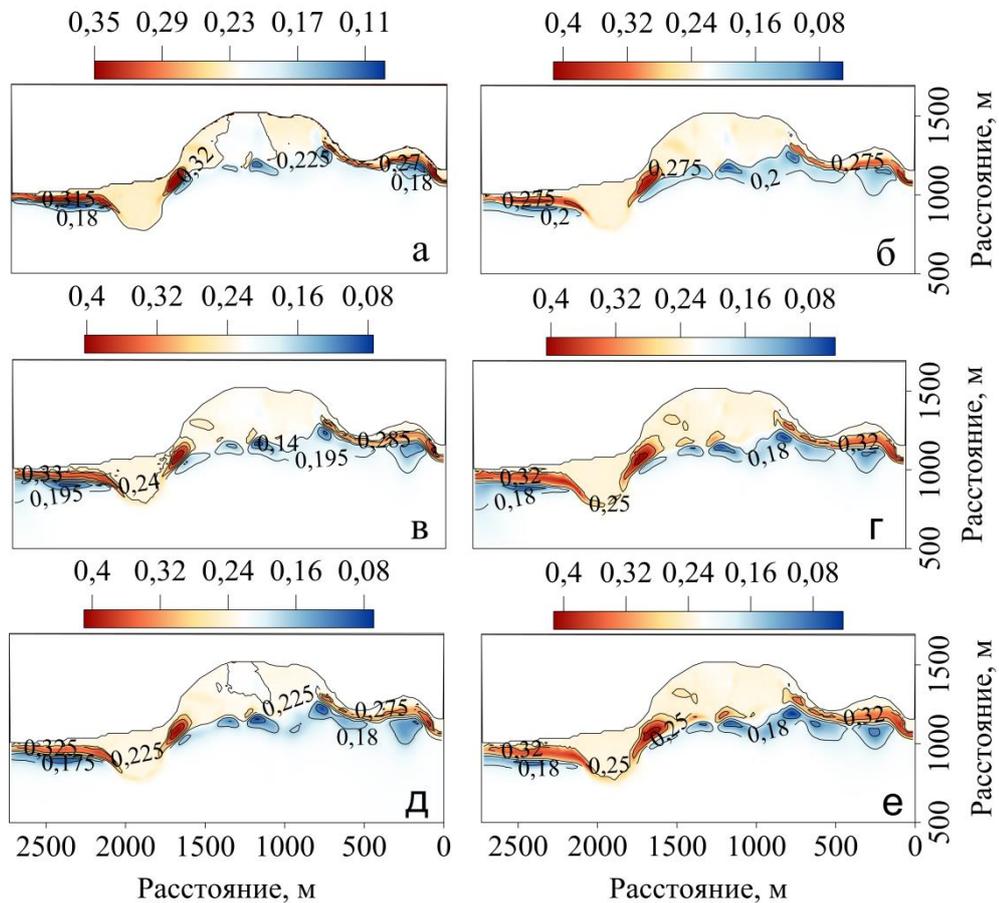


Рисунок 5.12 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой песчаной фракции для $h_s = 3,6$ м через 6 ч (а), через 12 ч (б); для $h_s = 4,5$ м через 6 ч (в), через 12 ч (г); для $h_s = 5$ м через 6 ч (д), через 12 ч (е)

Кроме того, для крайних западной и восточных частей исследуемого района накопление мелкозернистой фракции продолжалось вплоть до глубины 30–35 м. Увеличение доли мелкозернистого материала наиболее интенсивно отмечалось для ЮЮЗ волнения. Изменение интенсивности волнения на масштаб перераспределения материала в данном случае влияния не оказывало. Показано, что полученные результаты перераспределения гранулометрических фракций под

воздействием ветрового волнения не противоречат данным натурных наблюдений, описанным в параграфе 4.2.

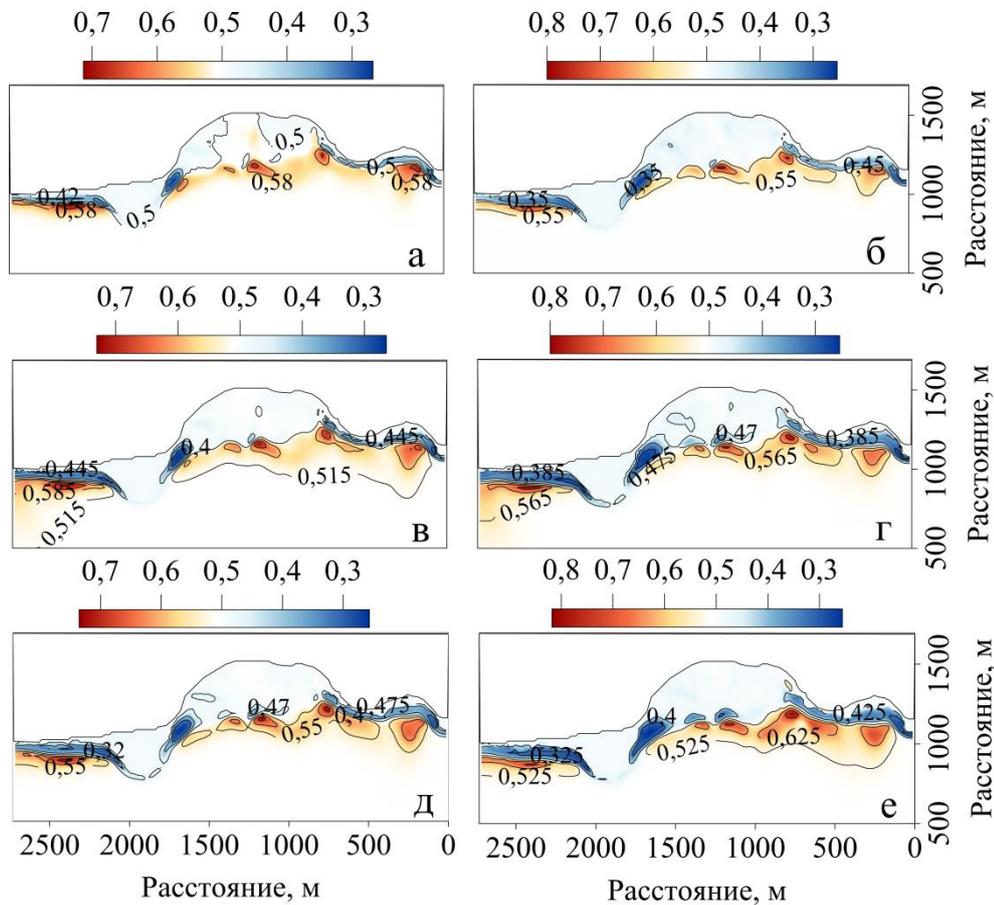


Рисунок 5.13 – Пространственное распределение объемных концентраций мелкозернистой песчаной фракции для $h_s = 3,6$ м через 6 ч (а), через 12 ч (б); для $h_s = 4,5$ м через 6 ч (в), через 12 ч (г); для $h_s = 5$ м через 6 ч (д), через 12 ч (е)

Во втором эксперименте в качестве начальных условий принималась комбинация из трех фракций. Пространственное распределение объемных концентраций каждой фракции было основано на результатах, полученных в ходе мониторинговых работ (см. параграф 4.2). Начальное распределение granulометрических фракций показано на Рисунке 5.14.

Анализ результатов численных расчетов показал, что, как и для первого эксперимента, накопление крупнозернистого материала отмечалось вокруг оконечностей мысов (Рисунок 5.15, а, г, ж). Однако ширина полосы накопления

крупнозернистых песков значительно увеличилась и через 12 часов волнового воздействия в районе западного мыса изменялась от 114 м при $h_s = 3,6$ м до 137 м при $h_s = 4,5$ м и 142 м при $h_s = 5$ м. Кроме того, накопление крупнозернистого материала отмечалось в более широком диапазоне глубин – от 3 до 11 м. Глубже изобаты 13 м в восточной части исследуемой акватории и 20 м в западной части происходило сокращение объемных концентраций крупнодисперсного материала, что во многом определяется выбранными начальными условиями.

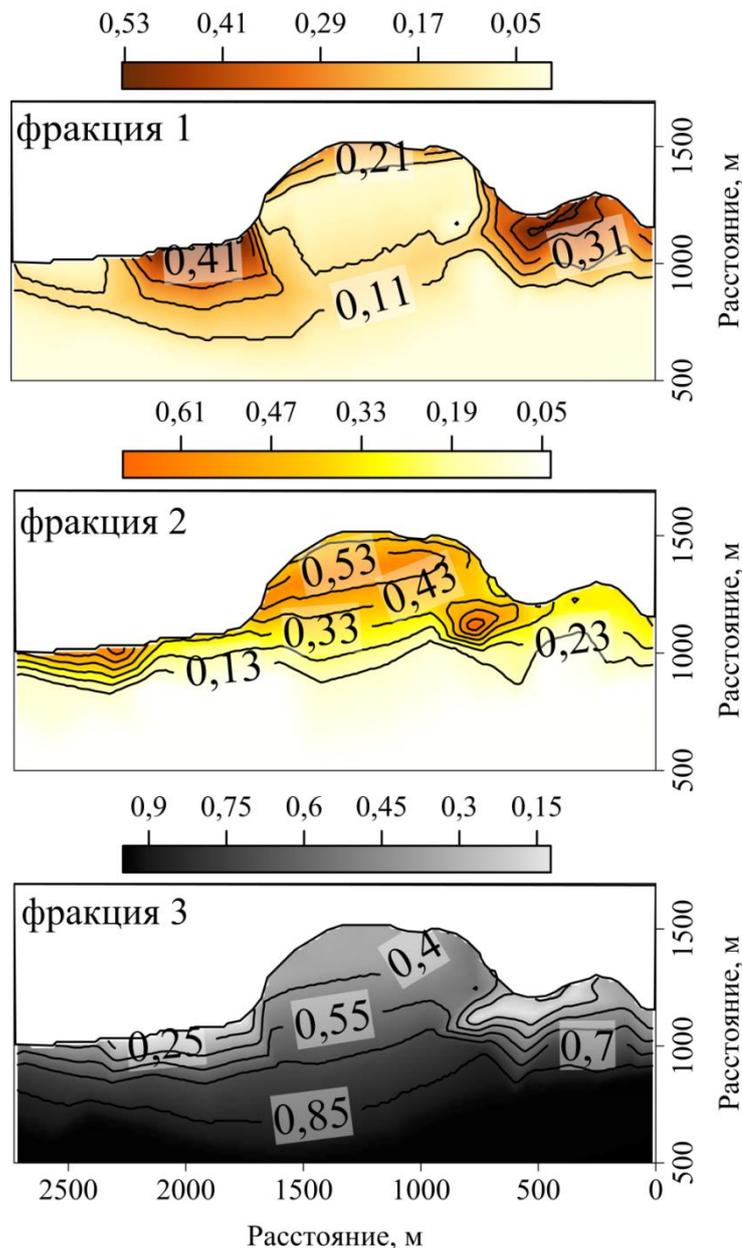


Рисунок 5.14 – Начальное распределение фракций наносов: а) крупнозернистый материал, б) среднезернистый материал, в) мелкозернистый материал

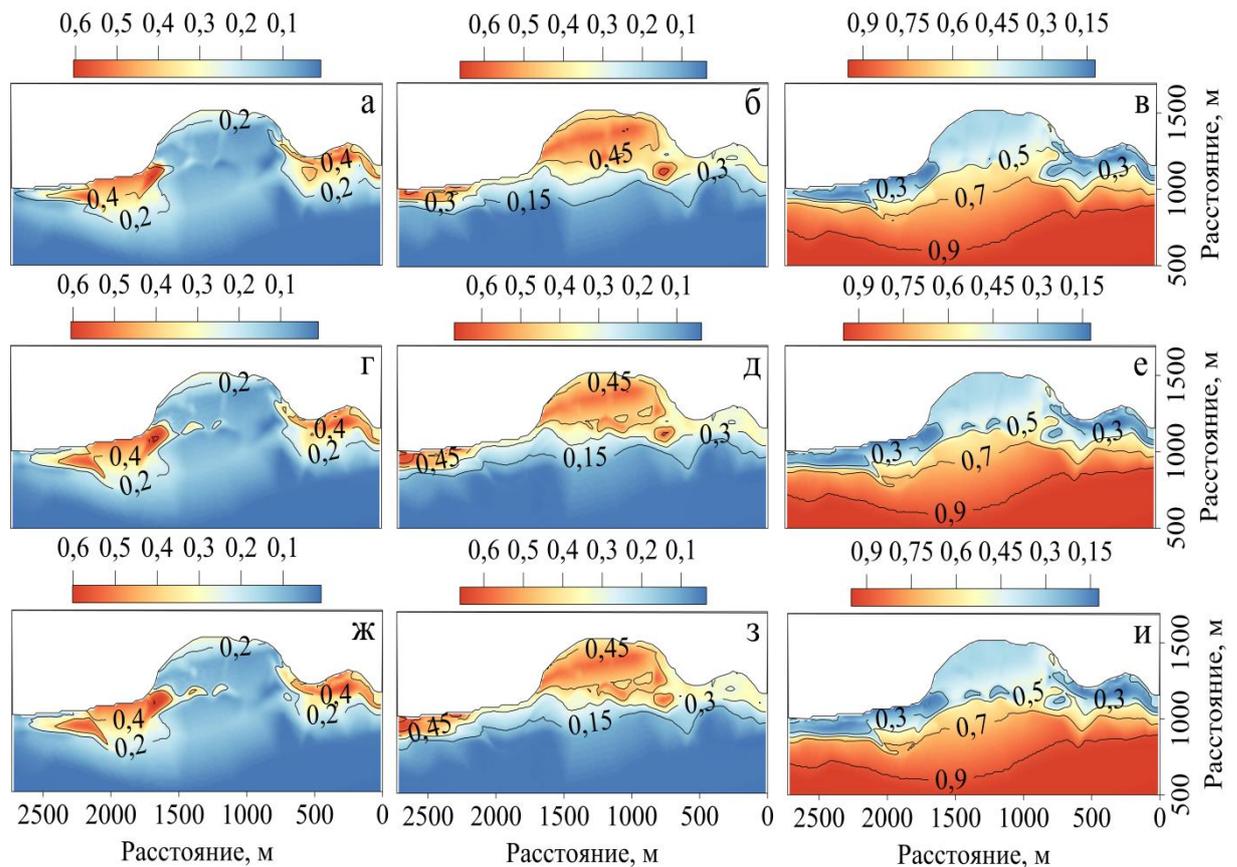


Рисунок 5.15 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой (а, г, ж); среднезернистой (б, д, з); мелкозернистой (в, е, и) гранулометрических фракции при $t = 12$ ч для $h_s = 3,6$ м (а, б, в), 4,5 м (г, д, е) и 5,1 м (ж, з, и)

В центральной части залива между изобатами 6–10 м с увеличением значений h_s отмечалось переотложение крупнозернистого материала. Объемные концентрации изменялись от 0,18 при $h_s = 3,6$ м до 0,34 при $h_s = 4,5$ м и 0,42 при $h_s = 5$ м. Основное перераспределение гранулометрических фракций происходило в течение первых 6 часов. Наибольшее накопление отмечалось для волнения с $h_s = 4,5$ м.

Для среднезернистого материала отмечалось общее уменьшение объемных концентраций от 0,69 в начальный момент времени до 0,66 через 12 часов штормового воздействия. Наблюдался перенос песчаного материала в северо-западном направлении и его накопление в центральной части акватории и

крайней западной части исследуемой области. В целом распределение среднезернистых песков в Лименском заливе было ограничено изобатой 15 м.

Мелкозернистый материал был расположен преимущественно в глубоководной части исследуемой акватории. В течение штормового воздействия продолжительностью 12 часов основная его часть выносилась за пределы изобаты 10 м. Граница равномерного увеличения объемных концентраций алевритового материала изменялась от 11 м для центральной части акватории до 13 м в его крайней западной и 14–20 м в крайней восточной частях.

Кроме изучения особенностей перераспределения фракций различной крупности в работе была рассмотрена качественная и количественная динамика величины относительного среднего диаметра частиц (D) (пункт 3.2.2, формула (3.21)). Анализ полученных результатов показал, что через 12 часов штормового воздействия величина D уменьшалась на 19,5% при $h_s = 3,6$ м, на 27,2% при $h_s = 4,5$ м и на 35,2% при $h_s = 5$ м (Рисунок 5.16). Максимальное увеличение среднего диаметра (81,9%) было отмечено для $h_s = 4,5$ м, а минимальное (78,9%) для $h_s = 3,6$ м. Анализ особенностей пространственного распределения величины D показал, что независимо от интенсивности волнового воздействия до изобаты 11–12 м происходило увеличение значений, а глубже – уменьшение.

Анализ полученных результатов показал, что основным определяющим фактором, регулирующим перемещение материала, является глубина и уклон дна.

Для района вблизи м. Кикинеиз было показано, как соотносились изменение объемных концентраций каждой фракции и величины уклона дна через 6 и 12 часов штормового воздействия (Рисунок 5.17). Установлено, что вблизи берега на участке 0–95 м через 6 ч и 0–115 м через 12 ч наблюдался резкий спад величин уклона дна от 0,16 до 0,049 и от 0,22 до 0,051 соответственно. Кроме того, здесь же отмечалось увеличение концентраций крупнозернистого материала и сокращение доли мелкозернистой фракции. Второй участок характеризовался незначительным ростом величин уклона дна (от 0,049 до 0,056), его ширина становилась равной 60 м через 6 ч и за время развития шторма не изменялась. Для второго участка отмечалось увеличение концентраций мелкозернистой фракции и

сокращение крупнозернистой. Третий участок характеризовался равномерным плавным уменьшением величин угла наклона от 0,056 до 0,053 на расстоянии 180–500 м от берега.

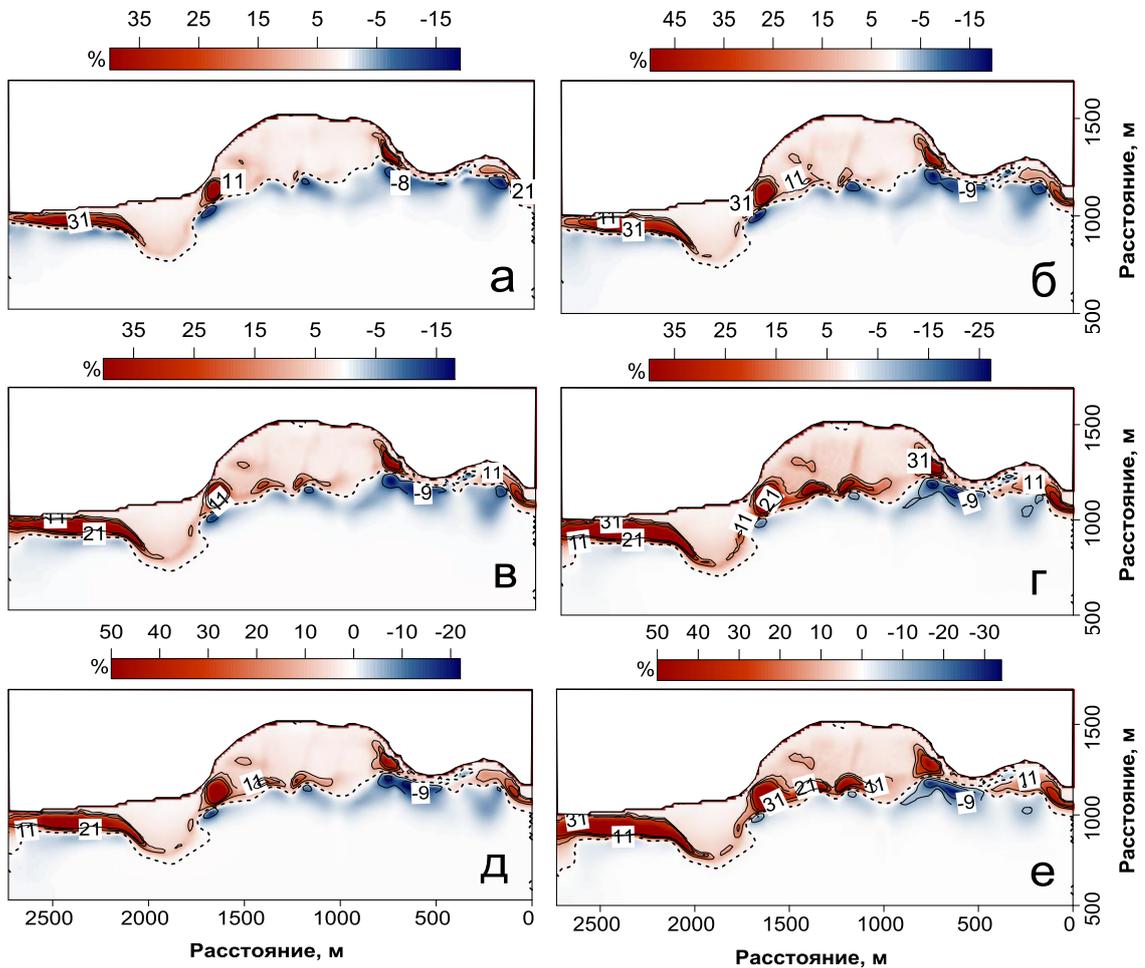


Рисунок 5.16 – Пространственное распределение величины D (%) при $h_s = 3,6$ м через 6 ч (а), через 12 ч (б); для $h_s = 4,5$ м через 6 ч (в), через 12 ч (г); для $h_s = 5$ м через 6 ч (д), через 12 ч (е). Пунктирная линия – граница между зонами возрастающих и уменьшающихся значений D

Полученные результаты показали, что из выбранных гидродинамических параметров, только изменение высоты волны оказывает влияние на характер перераспределения наносов. С изменением направления волнения незначительно меняются максимальные и минимальные значения отдельных фракций.

Отмечено, что крупнозернистый материал накапливался в прибрежной зоне в районах мысов, среднезернистая фракция накапливалась в центральной мелководной части залива, а мелкозернистый материал в процессе штормового воздействия выносился в мористую часть акватории и аккумулировался за счет ослабления гидродинамической активности. В целом, основное перераспределение фракций происходило в течение первых 6 часов, и ограничивалось изобатой 20 м

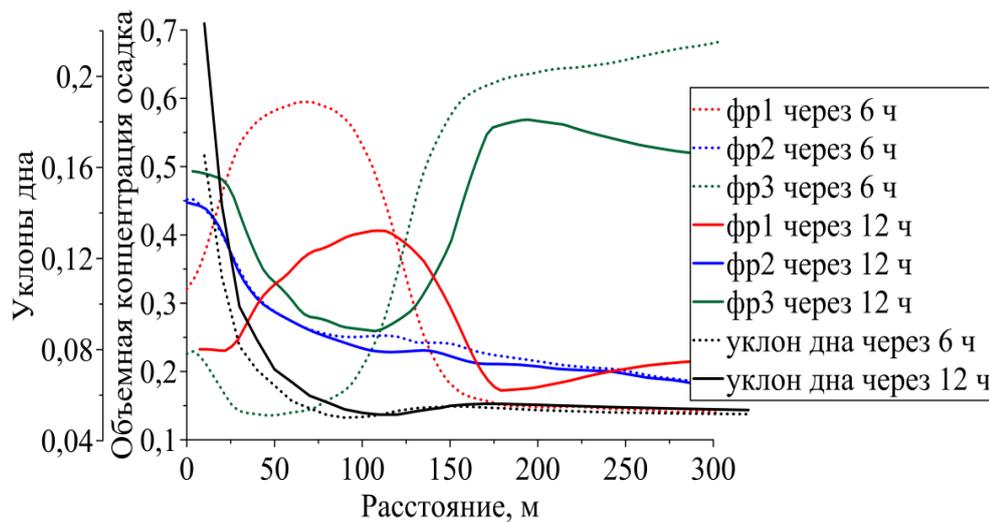


Рисунок 5.17 – Особенности перераспределения гранулометрических фракций и динамика угла наклона дна для южного волнения, $h_s = 5$ м

Полученные результаты согласуются с ранними исследованиями [Алексеев, 2013] и теоретическими представлениями о характере распределения фракций в прибрежной зоне [Зенкович, 1960, 1962].

5.3 Балаклавская бухта

Использование методов математического моделирования позволило оценить влияние ветрового волнения на перераспределение гранулометрических фракций на примере полузамкнутой акватории эстуарного типа.

При проведении численных экспериментов использовались данные о гранулометрическом составе донных наносов, полученные в ходе выполнения мониторинговых наблюдений, осуществляемых МГИ РАН в 2005, 2015, 2018 и 2019 гг. и представленных в параграфе 4.3. Данные о рельефе дна были получены путем оцифровки батиметрической карты Балаклавской бухты (Рисунок 5.18).

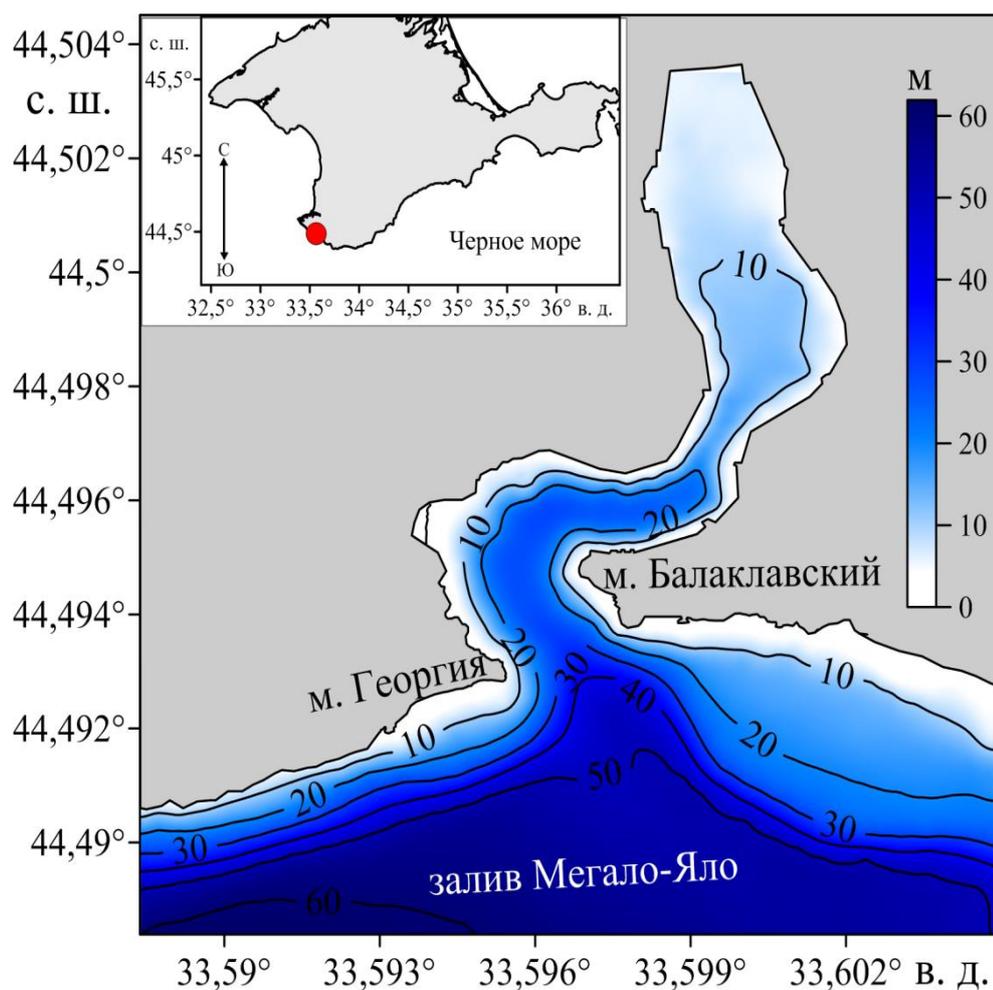


Рисунок 5.18 – Район исследований и рельеф дна Балаклавской бухты

Для района Балаклавской бухты, как и для акватории Лименского залива (параграф 5.2), было проведено два численных эксперимента. В первом эксперименте в качестве начальных условий использовалось однородное дно, состоящее из осредненных значений трех фракций. Для второго эксперимента использовалась комбинация из трех фракций, пространственное распределение которых основано на результатах мониторинговых исследований.

Гранулометрический состав донных наносов задавался в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок – среднезернистый песок – мелкозернистый песок), распределенных с различным соотношением объемных концентраций на различных участках исследуемой акватории. Основные исследуемые параметры наносов, такие как средняя объемная концентрация каждой фракции, медианный диаметр и относительный средний диаметр наносов, рассчитывались по соответствующим формулам (3.18) – (3.21), описанным в пункте 3.2.2. В качестве основного изменяемого параметра гидродинамической системы было выбрано ветровое волнение. Показано, каким образом изменение направления волнения оказывает влияние на характер перераспределения наносов.

В первом эксперименте в качестве начальных параметров принималась однородная комбинация гранулометрических фракций. Содержание крупнозернистого материала составило 25%, среднезернистого – 10% и мелкозернистого – 65%. Выбранные значения удовлетворяли средним концентрациям для каждой фракции по всей акватории [Гуров и Фомин, 2021].

Полученные результаты моделирования показали, что для акватории Балаклавской бухты основное перераспределение песчаного материала, вызванное штормовым волнением, отмечалось только в пределах южного бассейна, а также на выходе из бухты в береговой зоне залива Мегало-Яло. В первую очередь это определяется особенностями очертания береговой линии, а именно коленовидной узостью, разделяющей северный и южный бассейны.

Перераспределение гранулометрических фракций наносов начиналось сразу с активизацией волнового воздействия. На Рисунках 5.19 и 5.20 представлены пространственные распределения объемных концентраций гранулометрических фракций в районе Балаклавской бухты после 6 и 12 ч действия штормового волнения разных направлений [Гуров и Фомин, 2021].

Анализ представленных полей показал, что крупнозернистый и среднезернистый материал распределялись в береговой зоне и в районах, прилегающих к мысам. Расположение, а также ширина областей максимальных

концентраций крупнозернистого материала в западной и восточной частях исследуемого участка береговой зоны менялись с изменением направления волнения (Рисунок 5.19).

Максимальные концентрации крупнозернистого материала прослеживались между изобатами 5 и 8 м в западной части и 6–10 м в восточной. У западного берега накопление материала крупной и средней зернистости отмечалось до изобаты 4 м. С глубиной содержание крупнозернистых фракций сокращалось, достигая в пределах изобат 12–18 м своих минимальных значений. В районе мысов отмечался резкий спад глубин, в результате чего накопление крупного материала отмечалось до изобат 15–17 м. С увеличением продолжительности волнового воздействия изменялось количество транспортируемого материала. Это привело к тому, что полоса накопления крупнозернистого песка расширялась. В зависимости от угла направления волнения она незначительно изменялась: в западной части от 50–65 м через 6 ч до 60–80 м через 12 ч, а в восточной от 105–110 м через 6 ч и до 115–120 м через 12 ч [Гуров и Фомин, 2021].

При $t = 12$ ч максимальное накопление крупнозернистого материала происходило в восточной части береговой зоны на выходе из бухты при волнении юго-юго-восточного направления между изобатами 7 и 9 м, а при южном и юго-юго-западном направлениях – между изобатами 6 и 10 м. Максимальная доля крупнозернистой фракции для волнения юго-юго-восточного направления составила 0,50, для южного направления – 0,45, а для юго-юго-западного – 0,43 [Гуров и Фомин, 2021].

Мелкодисперсный материал, начиная с первых часов штормового воздействия, выносился из береговой зоны и накапливался на участках свала глубин (Рисунки 5.18 и 5.20). Максимальные концентрация отмечались между изобатами 12–18 м, общее перераспределение мелкого материала достигает изобат 30–40 м. Ширина области накопления мелкого песка изменялась как по времени, так и в зависимости от направления волнения [Гуров и Фомин, 2021].

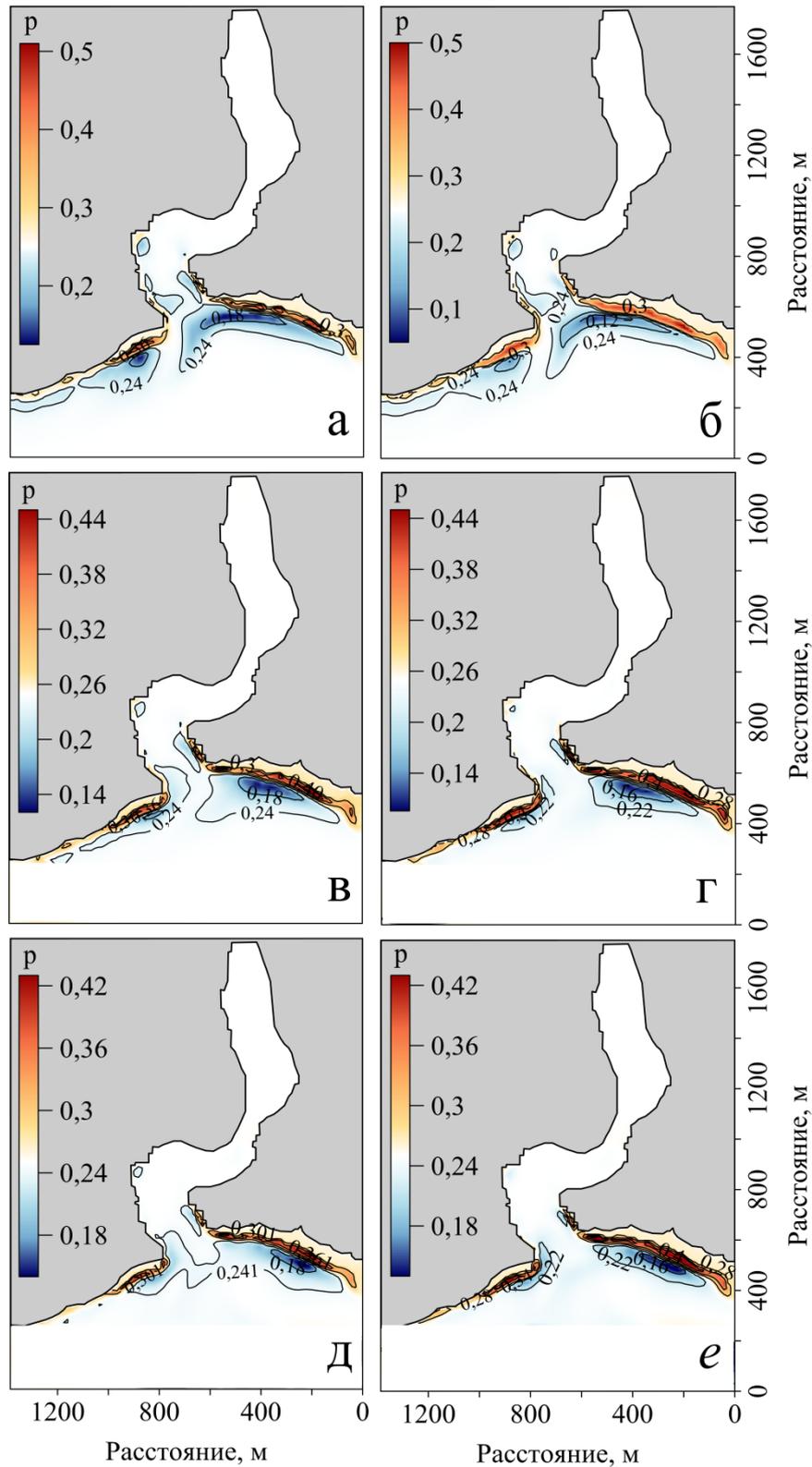


Рисунок 5.19 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой песчаной фракции при волнении юго-юго-восточного (а, б), южного (в, г) и юго-юго-западного (д, е) направления через 6 ч (а, в, д) и через 12 ч (б, г, е) после начала действия волнения

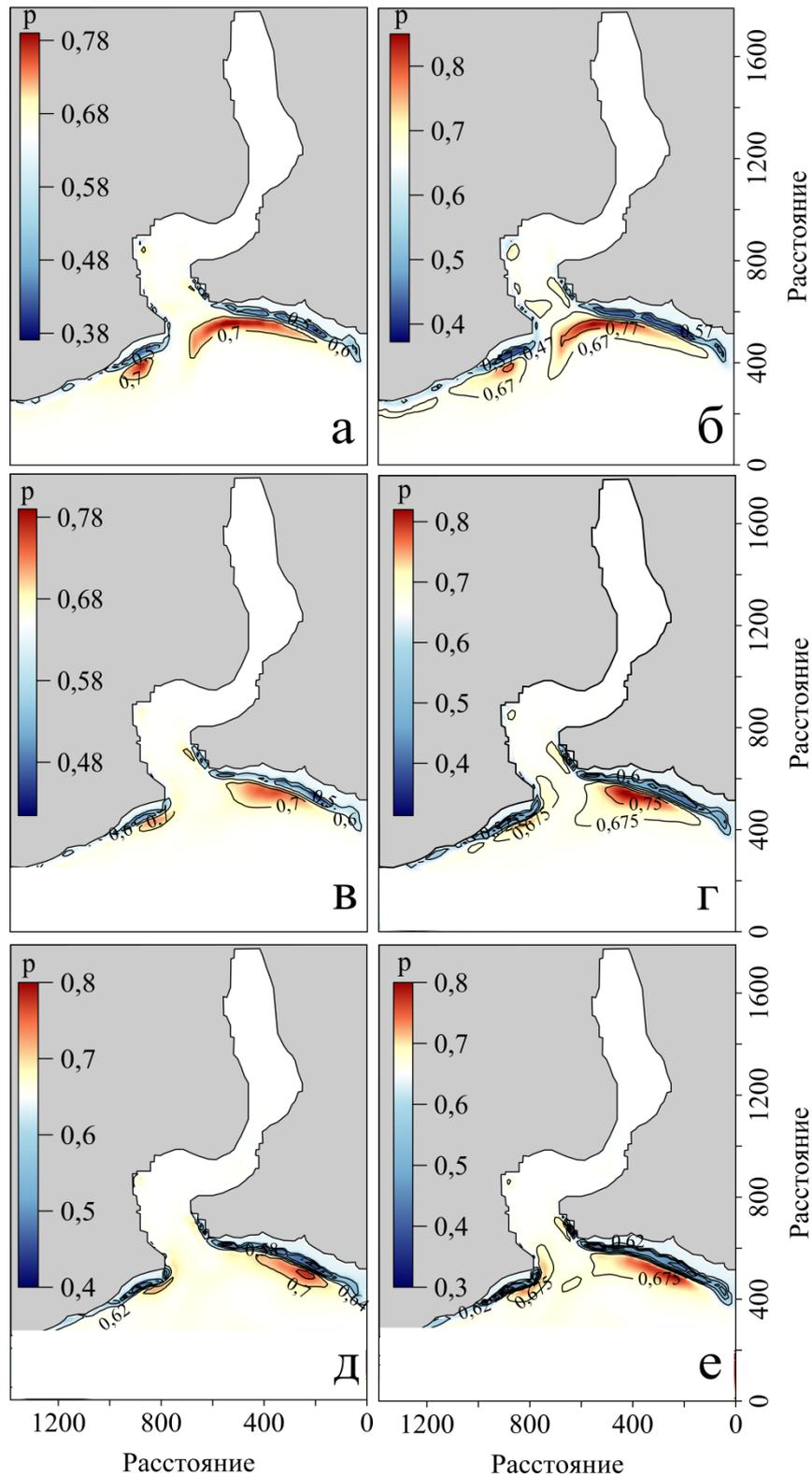


Рисунок 5.20 – Пространственное распределение объемных концентраций мелкозернистой песчаной фракции при волнении юго-юго-восточного (а, б), южного (в, г) и юго-юго-западного (д, е) направления через 6 ч (а, в, д) и через 12 ч (б, г, е) после начала действия волнения

Установлено, что независимо от угла направления волнения концентрация мелкого песка преобладала у восточного берега на выходе из бухты. Ширина области накопления фракции через 12 часов шторма изменялась от 80–115 м при юго-юго-восточном волнении до 120 м при ЮЮЗ и 150 м при Ю (Рисунок 5.20). Показано, что полученные результаты перераспределения гранулометрических фракций под воздействием ветрового волнения не противоречат данным натуральных наблюдений, описанным в параграфе 4.3.

Во втором цикле численных экспериментов в качестве начальных параметров принималась комбинация из трех фракций. Начальное распределение объемных концентраций каждой фракции было основано на результатах, полученных в ходе экспедиционных мониторинговых работ (см. параграф 4.3). Начальное распределение гранулометрических фракций показано на Рисунке 5.21.

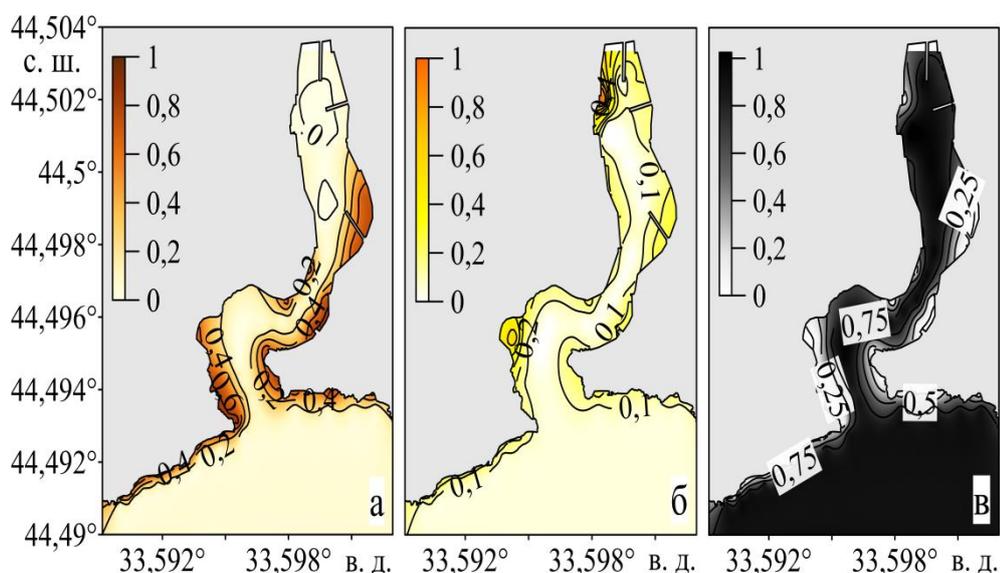


Рисунок 5.21 – Начальное распределение фракций наносов: а) крупнозернистый материал, б) среднезернистый материал, в) мелкозернистый материал

Как показали расчеты, накопление крупнозернистого материала происходило в юго-восточной части северного бассейна, в северной части южного бассейна и вокруг оконечностей мысов на выходе из бухты (Рисунок 5.22). Перенос крупно- и среднезернистого материала от берега к фарватеру в

северной части южного бассейна, по-видимому, определялся особенностями очертания береговой линии и рефракцией волн. Среднезернистый материал был распространен широкой полосой (95–120 м) на выходе из бухты, в северной части южного бассейна, а также в вершине северной части бухты. Накопление мелкозернистой фракции происходило в северо-западной части северного бассейна, в районе фарватера и на выходе из бухты [Гуров и Фомин, 2021].

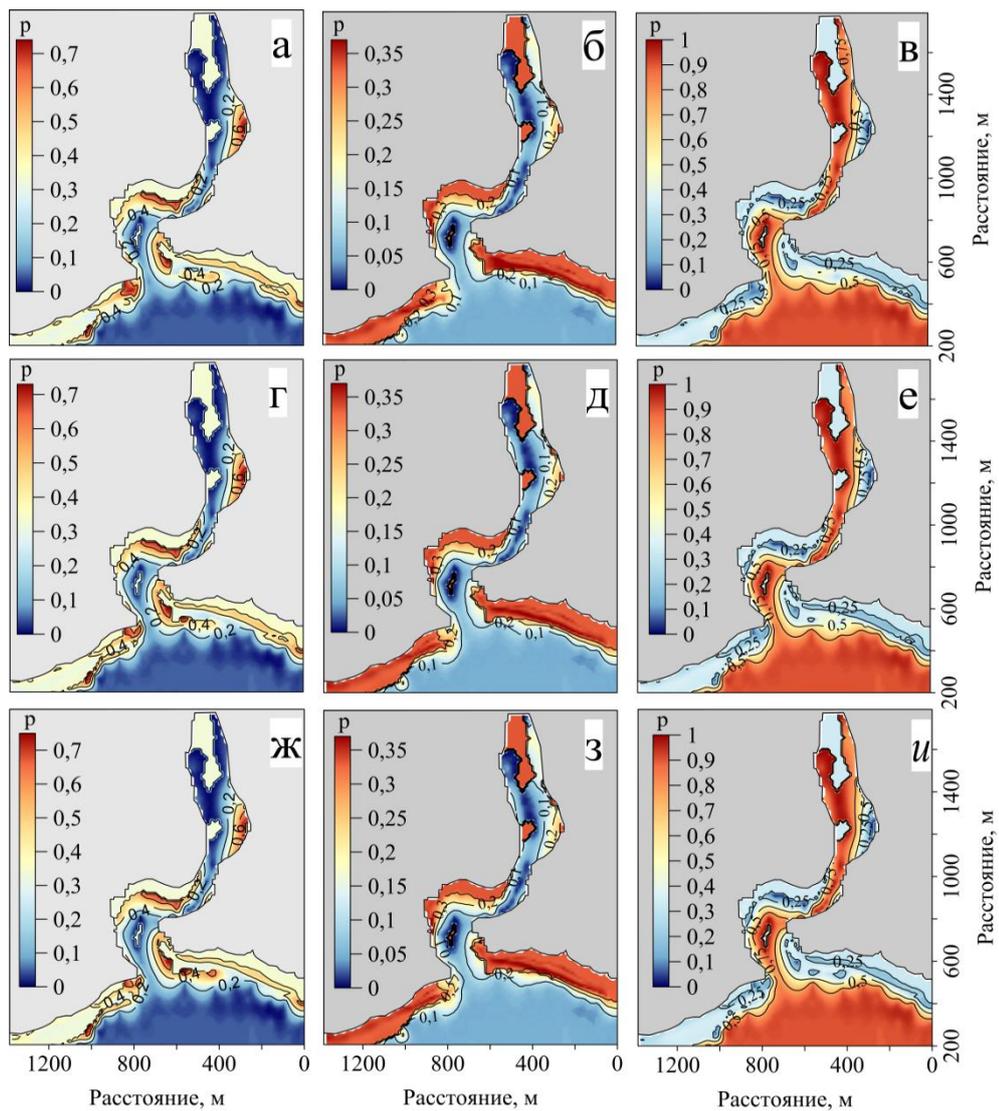


Рисунок 5.22 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой (а, г, ж); среднезернистой (б, д, з); мелкозернистой (в, е, и) гранулометрических фракции при $t = 12$ ч для волнения юго-юго-восточного (а, б, в), южного (г, д, е) и юго-юго-западного (ж, з, и) направлений

Особенности динамики гранулометрических фракций в акватории южного бассейна были рассмотрены на примере профиля у мыса Георгия (Рисунок 5.18).

Ширина полосы накопления крупнозернистых песков через 12 часов волнового воздействия в районе мыса Георгия вне зависимости от направления волнения составляла 100–110 м. В пределах этой полосы концентрации были не постоянны, отмечалось наличие двух пиков и понижение величин между ними. Положение мористого пика устанавливалось на глубинах 15–17 м. Ширина зоны, в которой накапливался крупнозернистый материал, близи берега, в зависимости от угла волнения, изменялась от 60 м для юго-юго-восточного волнения до 30–50 м для южного и юго-юго-западного направлений. Кроме того, повышенные концентрации гравийного материала у берега формировали положительную форму рельефа дна с перепадом глубин на участке 0–60 до 1 м [Гуров и Фомин, 2021].

Отмеченный перепад в величинах крупного песка на участке 50–90 м заполнялся фракцией средней зернистости. Отмечено, что ширина полосы накопления среднего песка изменялась обратно пропорционально зоне распространения крупного песка. По мере развития шторма она сужалась от 50 м через 4 ч до 30 м через 12 ч.

Концентрации мелкозернистой фракции вблизи берега были минимальны. На участке 0–50 метров они составляли всего 0,07–0,1. Изменения, определяемые интенсивностью волнения, отмечались на участке 50–100 м между изобатами 7,5 и 15 м. С глубиной концентрации крупного алеврита только увеличивались [Гуров и Фомин, 2021].

Как и в расчетах в первом цикле численных экспериментов, одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения фракций являлся уклон дна. Для примера рассмотрен участок мыса Георгия на выходе из бухты для волнения юго-юго-западного направления (Рисунок 5.23).

В зоне активной переработки профиля происходило сглаживание мелкомасштабных неоднородностей рельефа и по уклонам поверхности β можно выделить три характерных участка. С изменением периода волн уклоны для

каждого участка изменялись в незначительных пределах. Первый участок ($1,42 < \beta < 0,12$) характеризовался повышенными величинами уклонов дна, их резким спадом на отрезке, который в зависимости от продолжительности волнового воздействия изменялся от 0–45 м через 4 ч до 0–50 м через 6 ч и 0–60 м через 12 ч. Данный участок характеризовался максимальным накоплением крупнозернистой фракции. Второй участок ($0,13 < \beta < 0,16$) отмечался незначительным увеличением уклонов дна, в результате чего происходило осаждение более мелких фракций. В зависимости от продолжительности волнового воздействия его ширина изменялась от 35 м через 4–6 ч до 40 м через 12 ч. В пределах этого участка отмечались максимальные концентрации среднезернистого (0,2–0,35) и мелкозернистого (0,1–0,3) материала. Третий участок ($0,16 < \beta < 0,19$) характеризовался стабильным ростом величин уклона дна. Его положение определялось мористой границей второго участка и положением границы области, где волновая переработка профиля не происходила [Гуров и Фомин, 2021].

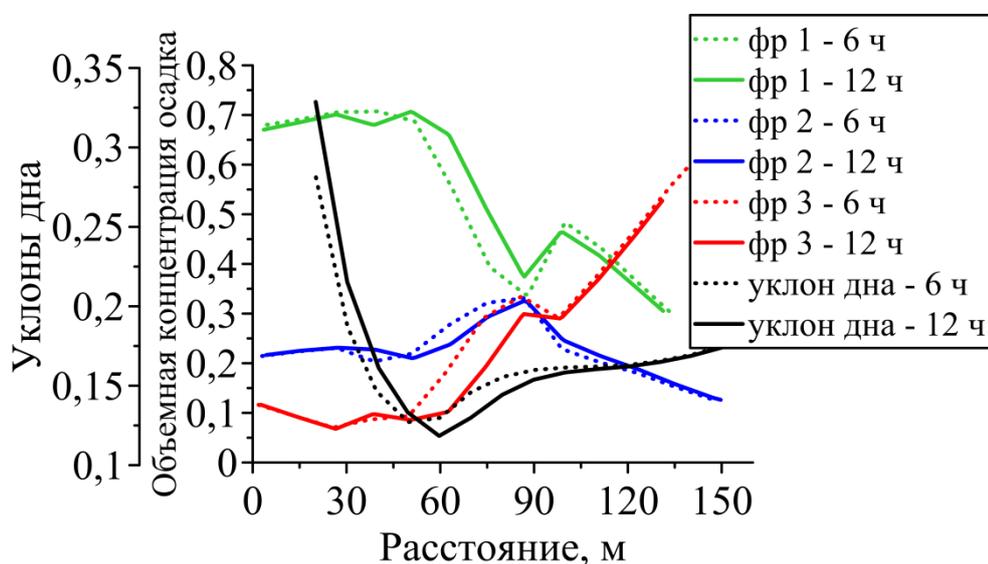


Рисунок 5.23 – Особенности перераспределения гранулометрических фракций (крупнозернистой – зеленая линия, среднезернистой – синяя линия, мелкозернистой – красная линия) и динамика угла наклона (черная линия) дна при волнении юго-юго-западного направления в районе мыса Георгия через 6 ч (пунктирная линия) и 12 ч (прямая линия)

Результаты моделирования показали, что, несмотря на изолированность северной части Балаклавской бухты от волнения открытого моря (южный сектор), под воздействием штормов южного, юго-юго-восточного и юго-юго-западного направлений, возможных один раз в год, продолжительностью 12 ч в северном бассейне наблюдается незначительная динамика песчаного материала. Отмечалось перераспределение фракций донных наносов от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу бухты [Гуров и Фомин, 2021].

Подтверждено, что основными определяющими факторами, регулирующими перемещение материала, являются глубина и уклон дна. Установлено, что резкое изменение угла наклона дна между изобатами 6–7 и 7–8 м сначала приводит к осаждению крупных и средних фракций, а на участке между изобатами 9–10 м и 10–12 м к осаждению уже мелкодисперсного песка [Гуров и Фомин, 2021].

Выводы к главе 5

В пятой главе с помощью методов математического моделирования проведен анализ основных особенностей динамики гранулометрического состава донных наносов в прибрежных районах акваторий Каламитского и Лименского заливов и Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения. Показано, что полученные результаты перераспределения гранулометрических фракций под воздействием ветрового волнения не противоречат данным натурных наблюдений.

Результаты, полученные на участках Каламитского залива, показали, что на интенсивность перемещения гранулометрических фракций по монотонному профилю значительное влияние оказывает крупность материала и расположение границ его раздела, а также интенсивность волнения. Установлено, что в Каламитском заливе основные морфодинамические процессы происходят в пределах участка 100–120 м от уреза и ограничиваются изобатой 2,5–3,5 м. Установлено, что в результате перемещения отдельных фракций наносов

происходит изменение распределения медианного диаметра частиц всей смеси (параметра D50). В зоне береговой абразии и отступления береговой линии величины среднего диаметра растут, а в приурезовой полосе в результате замещения крупнозернистого материала среднезернистым песком – уменьшаются.

Для акватории Лименского залива показано, что в процессе штормового воздействия крупнозернистый материал накапливается в прибрежной зоне в районах мысов, среднезернистые фракции накапливаются в центральной мелководной части залива, а мелкозернистый материал выносится в мористую часть акватории и накапливается здесь за счет ослабления гидродинамической активности. В целом, основное перераспределение фракций происходит в течение первых 6 ч, и ограничивается изобатой 20 м. Основными факторами, регулирующими перемещение материала, является глубина и уклон дна.

Результаты исследований в акватории Балаклавской бухты показали, что основным определяющим фактором, регулирующим перемещение материала, является глубина и уклон дна. Установлено, что основное перераспределение песчаного материала, вызванное штормовым волнением, отмечается в пределах южного бассейна, а также на выходе из бухты в береговой зоне залива Мегало-Яло. В первую очередь это определяется особенностями очертания береговой линии, а именно коленовидной узостью, разделяющей северный и южный бассейны. Расположение областей максимальных концентраций крупнозернистого материала, а также ширина областей накопления менялись с изменением угла волнения. Установлено, что для северной кутовой части Балаклавской бухты под воздействием интенсивных южных штормов наблюдается незначительная динамика песчаного материала. Отмечается перераспределение фракций донных наносов от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу бухты.

Результаты исследований, представленные в пятой главе работы, опубликованы в [Гуров и др., 2016; Fomin et al., 2017; Gurov and Fomin, 2017; Гуров и др., 2019; Гуров и Фомин, 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию факторов формирования и динамики гранулометрического состава донных наносов прибрежных районов Крыма, существенно отличающихся по следующим характеристикам: очертание береговой линии, рельеф и уклоны дна и суши, особенности гидродинамики. На основе литературных данных выделены основные факторы формирования гранулометрического состава донных наносов прибрежных районов Крыма и проведена оценка влияния различных гидрометеорологических факторов и процессов на распределение гранулометрических фракций в поверхностном слое донных наносов и наносов береговой зоны для различных районов Крыма. Получены новые экспедиционные данные, с помощью комбинированной методики проведен анализ особенностей гранулометрического состава донных наносов в различных прибрежных районах Крыма. Полученные данные о гранулометрическом составе донных наносов исследуемых районов являются уникальными, так как подобные исследования проводились давно. Из полученных характеристик были сформированы массивы данных для их использования в качестве начальных условий для математической модели *XBeach*, а также для верификации результатов численного моделирования. С использованием данных натурных измерений и результатов численных расчетов выполнено исследование механизмов перераспределения гранулометрических фракций по профилю подводного берегового склона при различных параметрах волнения, проведена оценка региональных особенностей динамики гранулометрического состава донных наносов в прибрежной и береговой зонах Каламитского и Лименского заливов и Балаклавской бухты.

Основные результаты данного исследования состоят в следующем:

- 1) Основными факторами, контролирующими формирование и динамику наносов в прибрежных районах Крыма, являются глубина и профиль дна исследуемой акватории, рельеф прилегающей территории суши, гидродинамический режим акватории и поступление в нее терригенного и

биогенного материала. Отмечено, что динамика вод в прибрежной зоне исследуемых акваторий в значительной степени определяется поверхностным волнением, поэтому в ходе изучения особенностей перераспределения гранулометрических фракций особое внимание было уделено именно штормовым условиям.

2) Установлено, что для проб наносов Каламитского и Лименского заливов характерна двухвершинная диаграмма содержания фракций, образованных как крупно – так и мелкозернистыми частицами. Наибольшая доля приходится на гравийную и песчаную фракции. Наличие на диаграммах двух вершин свидетельствует о значительной неоднородности гранулометрического состава донных наносов. Донные наносы Балаклавской бухты представлены преимущественно мелкозернистым материалом.

3) Полученные результаты расширяют современные представления о структуре и пространственной изменчивости распределения крупно-, средне- и мелкозернистых фракций донных наносов под воздействием штормовых условий для акваторий, отличающихся орографией берега, рельефом дна и особенностями гидродинамики, а именно: крупнозернистый материал сконцентрирован вблизи берега и в районах мысов; среднезернистые фракции накапливаются в центральной мелководной части акваторий; мелкозернистый материал в процессе штормового воздействия выносится в мористую часть и накапливается здесь за счет ослабления гидродинамической активности.

4) Анализ результатов математического моделирования для Каламитского залива показал, что основные морфодинамические изменения и динамика песчаного материала происходят на участке 100-метровой зоны, ограниченной изобатой 2,5–3 м. Полученные результаты валидации численных расчетов с использованием данных полевых наблюдений показали хорошую качественную и количественную согласованность. Полученные результаты математического моделирования показали, что на интенсивность перемещения фракций по монотонному профилю значительное влияние оказывает

интенсивность волнения, крупность материала и расположение границы его раздела.

5) Результаты численного моделирования перераспределения фракций донных наносов Лименского залива показали, что основными факторами, регулирующим перемещение материала, является глубина и уклон дна. Также свой вклад вносит орография берега. Показано, что основное накопление крупнозернистого материала отмечается вокруг мысов, за которыми возникают области волновой тени. Из выбранных гидродинамических параметров, только изменение высоты волны оказывает влияние на характер перераспределения наносов. Основное перераспределение гранулометрических фракций происходит в течение первых 6-ти часов, и ограничивается изобатой 20 м.

6) Для района Балаклавской бухты показано, что, несмотря на замкнутость и изолированность ее северного бассейна от волнения открытого моря, под воздействием интенсивных южных штормов здесь наблюдается незначительная динамика песчаного материала. Динамика гранулометрических фракций в акватории бухты в первую очередь определяется особенностями очертания береговой линии, а именно расположением коленовидной узости, разделяющей северный и южный бассейны. Кроме того, установлено, что расположение областей максимальных концентраций фракций, а также ширина областей их накопления менялись с изменением угла волнения.

7) Для всех исследуемых объектов установлено, что в результате перемещения отдельных фракций наносов происходит изменение распределения медианного диаметра частиц всей смеси (параметра D50). В зоне береговой абразии и отступления береговой линии величины среднего диаметра растут, а в приурезовой полосе в результате замещения крупнозернистого материала среднезернистым песком – уменьшаются. В зоне положительных деформаций профиля дна рост величины D50 происходит также в результате увеличения доли среднезернистого песка и выноса мелкой фракции в мористую часть акватории. Результаты моделирования показали, что ширина этой зоны не зависит от начального распределения гранулометрических фракций и определяется только

изменением волновых параметров. Резкое уменьшение величины D_{50} при удалении от берега соответствует зоне перехода к области накопления исключительно мелкозернистого материала.

8) Полученные результаты численных расчетов для всех исследуемых районов позволили подтвердить полученные ранее представления об основных факторах, определяющих динамику гранулометрического состава донных наносов. Отмечено, что для районов с осложненной орографией берега значительное влияние на динамику донных наносов оказывает структура дна и особенности рельефа суши, с увеличением угла наклона дна накапливается крупно- и среднезернистый материал, а с уменьшением угла наклона – мелкозернистый. Для районов с прямолинейным характером береговой линии и параллельным расположением изобат перераспределение фракций определяется параметрами и интенсивностью ветрового волнения. Также было установлено, что одним из основных параметров, определяющим особенности перераспределения фракций, является пространственная неоднородность гранулометрического состава и границы расположения различных фракций по крупности. Показано, что полученные результаты перераспределения гранулометрических фракций под воздействием ветрового волнения не противоречат данным натурных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажгирей, Г.Д. Происхождение и развитие материков и океанических впадин / Г.Д. Ажгирей // Известия АН СССР Сер. геол. – 1971. – №3. – С. 20–33.
2. Алексеев, Д.В. Моделирование транспорта донных осадков в районе Голубого залива Черного моря / Д.В. Алексеев // Доповіді НАН України. – 2013. – № 12. – С. 94–100.
3. Алёмов, С.В. Многолетние изменения макрозообентоса Балаклавской бухты / С.В. Алёмов // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: Біологія. – 2010. – № 3(44). – С. 6–9.
4. Антонов, Л. Течения Евпаторийского залива / Л. Антонов // Записки по гидрографии – 1929. – Т. 5. – С. 85–88.
5. Анцыферов, С.М. Взвешенные наносы в верхней части шельфа / С.М. Анцыферов, Р.Д. Косьян. М : Наука, 1986. – 223 с.
6. Архангельский, А.Д. Геологическое строение и история развития Черного моря / А.Д. Архангельский, Н.М. Страхов. – М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1939. – 226 с.
7. Атлас волнения и ветра Черного моря / под ред. Г.В. Ржеплинского. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 111 с
8. Ациховская, Ж.М. Динамика вод Балаклавской бухты и прилегающей акватории Черного моря / Ж.М. Ациховская, А.А. Субботин // Экология моря. – 2000. – Вып. 50. – С. 5–8.
9. Блатов, А.С. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря / А.С. Блатов, В.А. Иванов. – К: Наукова думка, 1992. – 244 с.
10. Безруков, П.Л. Классификация осадков современных морских водоемов / П.Л. Безруков, А.П. Лисицын // Труды Института океанологии АН СССР. – 1960. – Т. 32. – С. 3 – 14.
11. Божич, П.К. К изучению движения береговых наносов Черного моря / П.К. Божич // Известия Центрального гидрометеорологического бюро. – 1927. Вып. 7. – С. 209–252.

12. Братусь, О.С. О гранулометрическом составе песчаных отложений Крыма / О.С. Братусь // Доклады АН СССР. – 1965. – Т. 163. – № 2. – С. 431–434.
13. Братусь, О.С. Вещественный состав пляжей Крымского полуострова / О.С. Братусь // Доклады АН СССР. – 1965а. – Т. 165. – № 2. – С. 399–402.
14. Буданов, В.И. Аккумулятивные формы и динамика берегов / В.И. Буданов, А.С. Ионин // Природа. – 1953. – №5. – С. 108–111.
15. Вериго, А.А. Исследование целебной грязи из мелководья Балаклавской бухты. / А.А. Вериго // Отчет о деятельности Одесского бальнеологического общества, 1883-1887 гг. – 1888. – Вып. 3. – С. 22–26.
16. Визе, В.Ю. Течения в Евпаторийской бухте / В.Ю. Визе // Известия Центрального гидрометеорологического бюро. – 1927. – №7. – С. 1–23.
17. Гармашов, А.В. ветровое волнение у Южного берега Крыма в летне-осенний период / А.В. Гармашов, Ю.Н. Толокнов, А.И. Коровушкин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №2(44). – С. 86–87. doi: 10.18454/IRJ.2016.44.140
18. Геология СССР. Т. 1. Крым. Ч. 1. Геологическое описание. – М.: Недра, 1969. – 576 с.
19. Геология шельфа УССР. Среда. История и методика изучения. – Киев: Наукова думка, 1982. – 180 с.
20. Геология шельфа УССР. Литология. – Киев: Наукова думка, 1985. – 192 с.
21. Глушков, В.Г. Исследования наносов Евпаторийского порта летом 1925 г. / В.Г. Глушков // Известия Центрального гидрометеорологического бюро. – 1926. – Вып. 6. – С. 179–183.
22. Горячкин, Ю.Н. Придонные течения в Каламитском заливе / Ю.Н. Горячкин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 17. – С. 258–264.
23. Горячкин, Ю.Н. Современные литодинамические процессы в прибрежной зоне Каламитского залива Черного моря / Ю.Н. Горячкин,

В.А. Иванов, В.В. Фомин // Литодинамика донной контактной зоны океанов. – М.: ГЕОС, 2009. – С. 75–77.

24. Горячкин, Ю.Н. Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма / Ю.Н. Горячкин, Л.Н. Репетин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 19. – С. 56–69.

25. Горячкин, Ю.Н. Характеристики волновых течений в Каламитском заливе / Ю.Н. Горячкин, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 23. – С. 159–165.

26. Горячкин, Ю.Н. Динамика наносов в Евпаторийской бухте, Черное море / Ю.Н. Горячкин, В.В. Фомин, Л.В. Харитонова // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. – 2013. – Т. 18, Вип. 2 (18). – С. 46–53.

27. Горячкин, Ю.Н. Морские берега Крыма / Ю.Н. Горячкин, В.В. Долотов, – Севастополь: ООО «КОЛОРИТ», 2019. – 256 с.

28. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. – М.: Госстандарт, 1984. – 5 с.

29. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ, 2008. – 16 с.

30. ГОСТ Р ИСО 11465-2011. Качество грунта. Определение массовой доли сухого вещества и массового отношения влаги гравиметрическим методом. – М.: Стандартиформ, 2012. – 11 с.

31. Гуров, К.И. Геохимические характеристики донных отложений акватории Каламитского залива Черного моря / К.И. Гуров, Е.И. Овсяный, Е.А Котельянец, С.К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – №5. – С. 69–80.

32. Гуров, К.И. Факторы формирования и отличительные особенности

физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / К.И. Гуров, Е.И. Овсяный, Е.А. Котельянец, С.К. Коновалов // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – №4. – С. 51–58.

33. Гуров, К.И. Моделирование перераспределения песчаных фракций по подводному береговому склону под воздействием ветрового волнения / К.И. Гуров, В.В. Фомин, Д.И. Лазоренко // Экологическая безопасность прибрежной зоны. – 2016. – Вып. 3. – С. 65–71.

34. Гуров, К.И. Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива / К.И. Гуров // Экологическая безопасность прибрежной зоны. – 2018. – Вып. 3. – С. 56–63. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-56-63

35. Гуров, К.И. Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) / К.И. Гуров, В.Ф. Удовик, В.В. Фомин // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т. 35, № 2 (206). – С. 185–196. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-185-196

36. Гуров, К.И. Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива / К.И. Гуров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – Вып. 1. – С. 36–46. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-1-36-46

37. Гуров, К.И. Математическое моделирование динамики гранулометрического состава донных отложений Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения / К.И. Гуров, В.В. Фомин // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37, № 1. – С. 85–97. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-1-85-97

38. Гуров, К.И. Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма / К.И. Гуров, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2021а. – № 2. – С. 30–46. DOI:10.22449/2413-5577-2021-2-30-46

39. Денисов, В.И. Потоки взвешенного вещества в прибрежной части шельфа в российском секторе Черного моря / В.И. Денисов // Система Черного моря / Отв. ред. академик РАН А.П. Лисицын. Москва : Научный мир, 2018. – С. 397–425. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.397
40. Дзенс-Литовский, А.И. Пересыпи и косы крымских соляных озер / А.И. Дзенс-Литовский // Известия Российского Географического общества. – 1933. – Т. 65, вып. 6. – С. 585–595
41. Ефимов, В.В. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря / В.В. Ефимов, О.И. Комаровская // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 59 с.
42. Зац, В.И. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. / В.И. Зац, О.Я. Лукьяненко, Г.В. Яцевич // Л.: Гидрометиздат. 1966. – 120 с.
43. Зац, Е.Н. Некоторые особенности метеорологического режима на юго-западе Крыма / Е.Н. Зац // Лаборатория южных морей: сб. работ. – Л., 1972. – Вып. 9. – С. 46–52.
44. Зенкович, В.П. Динамика и морфология морских берегов, Ч. 1 Волновые процессы. / В.П. Зенкович. – М. – Л.: Морской транспорт, 1946. – 495 с.
45. Зенкович, В.П. Строение берега западного Крыма у Евпатории / В. П. Зенкович // Вопросы географии. – 1948. – Вып. 7. – С. 179–186.
46. Зенкович, В.П. Берега Черного и Азовского морей / В.П. Зенкович. – М.: Географгиз, 1958. – 371 с.
47. Зенкович, В.П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря / В.П. Зенкович. – М.: Изд-во АН СССР, Т.1 1958. – 187 с.
48. Зенкович, В.П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря / В.П. Зенкович. – М.: Изд-во АН СССР, Т.2 1960. – 215 с.
49. Зенкович, В.П. Основы изучения и развития морских берегов / В.П. Зенкович. М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 710 с.
50. Иванов, В.А. Природопользование на Черноморском побережье Западного Крыма: современное состояние и перспективы развития / В.А. Иванов,

В.П. Ястреб, Ю.Н. Горячкин, А.В. Прусов, В.В. Зима, В.В. Фомин. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 321 с.

51. ИСО 11277:1998. Качество грунта. Определение гранулометрического состава и минерального материала грунта Метод просеивания и седиментации. – 29 с.

52. ИСО 5667-19:2004. Качество воды. Отбор проб. Часть 19. Методические указания по отбору проб морских отложений. – 11 с.

53. Карбасников, М.Н. Результаты обследования донных пород Евпаторийской бухты / М.Н. Карбасников // Известия Центрального гидрометеорологического бюро. – 1927. – № 7. – С. 184–202.

54. Кирьянов, М.Г. Локальные атмосферные процессы и особенности погодных условий на Черном море / М.Г. Кирьянов. – Севастополь: Гидрометцентр ЧФ, 1968. – 118 с.

55. Киселева, М.И. Изменение структуры бентосного сообщества на полигоне в районе Балаклавы (Крым, Черное море) / М.И. Киселева, Ю. В. Просвиров // Экология моря. – 2006. – Вып. 72. – С. 14–20.

56. Коваль, С.А. Компьютерная обработка результатов гранулометрического анализа и их генетическая интерпретация / С.А. Коваль, Г. В. Войцеховский. – Воронеж: ВГУ, 2001. – 35 с.

57. Котельянец, Е.А. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е.А. Котельянец, К.И. Гуров, Е.А. Тихонова, С. И. Кондратьев // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т. 35, №. 5. – С. 469–480. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-469-480

58. Котельянец, Е.А. Влияние физико-химических характеристик донных отложений на распределение микроэлементов на примере акваторий с различной антропогенной нагрузкой (Черное море) / Е.А. Котельянец, К.И. Гуров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – Вып. 4. – С. 117–129. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-4-117-129

59. Корзинин, Д.В. Особенности формирования профиля равновесия подводного берегового склона (на примере аккумулятивных берегов Западного

Крыма) / Д.В. Корзинин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2015. – Вып. 1. – С. 29–33.

60. Кубряков, А.И. Моделирование циркуляции и распространение загрязняющей примеси в Балаклавской бухте / А.И. Кубряков, М.А. Попов // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 49–61.

61. Кузнецова, О.А. Внутригодовые вариации штормовых деформаций рельефа дна песчаного побережья на примере Камчийско-Шкорпиловского пляжа (Черное море, Болгария) / О.А. Кузнецова, Я.В. Сапрыкина // Процессы в геосредах. – 2017. – № 1 (10). – С. 435–444.

62. Кузнецова, О.А. Моделирование изменчивости песчаного пляжа при взаимодействии волн с подводным валом / О.А. Кузнецова, Я.В. Сапрыкина // Геоморфология. – 2019. – № 3. – С. 57–67. doi:10.31857/S0435-42812019357-67

63. Куклин, А.К. Исследования гидрометеорологических характеристик ЮБК с океанографической платформы в Кацивели / А.К. Куклин, Н.Я. Куклина, О.А. Шабалина // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – Вып.2 (7). – С. 66–82.

64. Леонтьев, И.О. Бюджет наносов и прогноз развития морского берега / И.О. Леонтьев // Океанология. – 2008. – Т. 48, № 3. – С. 467–476.

65. Леонтьев, И.О. Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) / И.О. Леонтьев // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 5. – С. 757–767.

66. Леонтьев, И.О. Прогноз рецессии берегов восточной части Финского залива на ближайшее столетие / И.О. Леонтьев, Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, О.А. Ковалева // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 3. – С. 480–487. doi:10.7868/S0030157415030107

67. Леонтьев, И.О. О некоторых свойствах процесса формирования штормового профиля песчаного берега / И.О. Леонтьев // Процессы в геосредах. – 2015. – № 2. – С. 75–82.

68. Леонтьев, И.О. Моделирование берегового профиля, сформированного штормовым циклом / И.О. Леонтьев // *Океанология*. – 2018. – Т. 58, № 6. – С. 973–981. doi:10.1134/S0030157418060084
69. Леонтьев, И.О. Штормовые деформации берегового склона с подводными валами / И.О. Леонтьев // *Океанология*. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 125–132. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574591125-132>
70. Лисицын, А.П. Скорость современного осадконакопления в океанах / А.П. Лисицын // *Океанология*. – 1971. – №6. –С. 957–968.
71. Лисицын, А.П. Осадкообразование в океанах / А.П. Лисицын. М., Наука, 1974. – 438 с.
72. Лисицын, А.П. Процессы океанской седиментации / А.П. Лисицын. М., Наука, 1978. – 392 с.
73. Ломакин, П.Д. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты / П.Д. Ломакин, М.А. Попов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 184 с.
74. Лопатин, Г.В. Наносы рек СССР / Г.В. Лопатин. – М.: Географгиз, 1952. – 366 с.
75. Лоция Черного моря. – Л.: Гидрографический отдел УМС РККА, 1937. – 482 с.
76. Митропольський, О.Ю. Комплексний геоекологічний моніторинг шельфу – необхідна умова достовірної оцінки сучасного стану морських екосистем / О.Ю. Митропольський, Є.І. Наседкін, Ю.Д. Степаняк, О.С. Кузнецов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2005. – Вып. 13. – С. 111–116.
77. Мирзоева, Н.Ю. Оценка скорости седиментации и осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных (Чернобыльских) радионуклидов / Н. Ю. Мирзоева, С.Б. Гулин, И.Г. Сидоров, Л.В. Гулина // *Система Черного моря* / Отв. ред. академик РАН А. П. Лисицын. Москва : Научный мир, 2018. – С. 659–670. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.659

78. Миронов, О.Г. Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты / О.Г. Миронов, Л.Л. Кирюхина, С.В. Алёмов // Экология моря – 1999. – Вып. 49. – С. 16–21.

79. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / под ред. В.А. Иванова, В.А. Дулова. НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2014. – 526 с.

80. Наседкин, Е.И. Мониторинг сезонных изменений минерального состава взвешенного вещества осадконакопления / Е.И. Наседкин, А.С. Кузнецов, Н.Н. Цихоцкая, А.К. Ключина // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып.12. – С. 236–241.

81. Наседкин, Е.И. Некоторые результаты исследований влияния метеорологических факторов на процессы современного осадконакопления / Е.И. Наседкин, А.Н. Иванова, А.С. Кузнецов, А.К.В. Ключина, С.Н. Довбыш, Ж.Б. Тимофеева // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып.19. – С. 44–55.

82. Невесский, Е.Н. Исследования толщи прибрежных отложений с помощью вибропоршневой трубки / Е.Н. Невесский // ДАН СССР. – 1957. – Т. 112, № 3. – С. 418–426.

83. Невесский, Е.Н. Процессы осадкообразования в прибрежной зоне моря / Е.Н. Невесский. – М.: Наука, 1967. – 255 с.

84. Овсяный, Е.И. Мышьяк и тяжелые металлы в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е.И. Овсяный, Е.А. Котельянец, Н.А. Орехова // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 67–80.

85. Овсяный, Е.И. Исследование органического углерода и карбонатности в донных осадках шельфа Южного берега Крыма / Е.И. Овсяный, К.И. Гуров // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – № 1. – С. 62–72. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-1-62-72

86. Орехова, Н.А. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н.А. Орехова, Е.И. Овсяный, К.И. Гуров, М.А. Попов // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34, № 6. – С. 523–533. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-6-523-533

87. Пармузина, Л.В. Гранулометрический анализ песчано-алевритовых пород: методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Литология природных резервуаров нефти и газа» для специальности 130304 – «Геология нефти и газа» / Л.В. Пармузина. – Ухта: УГТУ, 2011. – 23 с.

88. Петелин, В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков / В.П. Петелин. – М.: Наука, 1967. – 128 с.

89. Попов, М.А. Геоморфологический очерк залива Мегало-Яло и Балаклавской бухты. / М.А. Попов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – Вып. 14. – С. 209–214

90. Потапова, Е.И. Особенности циркуляции на южной оконечности Крыма / Е.И. Потапова, Н.С. Потапов // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. – 1959 – Т. 16. – С. 29–43.

91. Промерь 1811 года // 1811. Санкт-Петербург, архив истории и материальной культуры РАН и ИМКРАН фонд 326, оп. 1, № 2165.

92. Пустовалов, Л.В. Петрография осадочных пород / Л.В. Пустовалов. М. – Л.: Гостоптехиздат. 1940. Ч. 1. – 420 с.

93. Репетин, Л.Н. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма / Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов, М.М. Липченко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – Вып. 8. – С. 13–28.

94. 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. – 2008. – Вып. 17. – С. 225–243.

95. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Вып. 5. Крым. – Л.: Гидрометиздат, 1975. – 148 с.
96. Романовский, С.И. Физическая седиментология / С.И. Романовский. Л.: Недра, 1988. – 240 с.
97. Руммель, В.Ю. Джарылгатский залив, Евпатория, Севастополь : Результаты изысканий, произведенных в 1896 г. / В.Ю. Руммель // Материалы для описания русских коммерческих портов и истории их сооружения. СПб : Комис. по устройству коммерч. портов, 1889. – 220 с.
98. Рухин, Л.Б. Гранулометрический метод анализа песков / Л.Б. Рухин. Изд-во ЛГУ, 1947. – 213 с.
99. Рухин, Л.Б. Основы литологии / Л.Б. Рухин. Изд. 3-е. Л. Недра, 1969. – 703 с.
100. Современное состояние береговой зоны Крыма / Под ред. Ю.Н. Горячкина. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. – 252 с.
101. Справочник по климату Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 405 с.
102. Страхов, Н.М. Образование осадков в современных водоемах / Н.М. Страхов, Н.Г. Бродская, Л.М. Князева – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 792 с.
103. Страхов, Н.М. Основы теории литогенеза / Н.М. Страхов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 1. – 212 с.
104. Страхов, Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли / Н.М. Страхов. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 535 с.
105. Твенхофел, У.Х. Учение об образовании осадков / Под ред. И.А. Преображенского. – М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 916 с.
106. Типовые поля ветра и волнения Черного моря. – Севастополь: ФОЛ СО ГОИН, 1987. – 116 с.
107. Тихонова, Е.А. Содержание органических веществ и тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты (Чёрное море) / Е.А. Тихонова, Е.А. Котельянец, К.И. Гуров // Экологическая безопасность

прибрежной и шельфовой зон моря. – 2019. – Вып. 3. – С. 82–89. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-3-82-89

108. Тримонис, Э.С. Минералогия крупноалевритовой фракции современных глубоководных осадков Черного моря / Э.С. Тримонис // Материалы по минералогии, петрографии и геохимии осадочных пород и руд. – Киев: Наукова думка. – 1976. – Вып. 4. – С. 37–49.

109. Удовик, В.Ф. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма / В.Ф. Удовик, Ю.Н. Горячкин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 363–368.

110. Удовик, В.Ф. Оценки межгодовой изменчивость вдольберегового транспорта наносов на участке береговой зоны от Евпатории до Севастополя / В.Ф. Удовик, Ю.Н. Горячкин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2015. – № 1. – С. 54–65.

111. Фомин, В.В. Моделирование волновых течений и транспорта наносов в прибрежной зоне Евпатории / В.В. Фомин, В.А. Иванов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – Вып. 13. – С. 211–226.

112. Фомин, В.В. Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте / В.В. Фомин, Л.Н. Репетин // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 4. – С. 43–58.

113. Фомин, В.В. Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты / В.В. Фомин, А.А. Полозок // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь, 2020. – Вып. 2. – С. 53–67.

114. Харитоновна, Л.В. Численное моделирование ветрового волнения у Западного побережья Крыма / Л.В. Харитоновна, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Вып. 25, Т.1. – С. 26–37.

115. Харитоновна, Л.В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979-2010 гг. / Л.В. Харитоновна, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – Вып. 26, Т.1. – С. 24–33.

116. Харитоновна, Л.В. Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы / Л.В. Харитоновна, Е.В. Иванча, Д.В. Алексеев // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – №. 1. – С. 79–90.

117. Харитоновна, Л.В. Пространственная структура потока наносов в береговой зоне Западного побережья Крыма по результатам численного моделирования / Л.В. Харитоновна, В.В. Фомин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2017. – №. 1. – С. 48–58.

118. Шванов, В.Н. Песчаные породы и методы их изучения / В.Н. Шванов. Л: Недра, 1969. – 248 с.

119. Швецов, М.С. Петрография осадочных пород / М.С. Швецов. М: Госгеолтехиздат, 1958. – 412 с.

120. Шестопалов, В.М. Инженерно-геологические опасности береговой зоны Горного Крыма / В.М. Шестопалов, В.А. Иванов, С.Г. Богуславский, А.С. Кузнецов, А.С. Богуславский, С.И. Казаков, А.В. Фесенко, А.В. Лущик, О.С. Романюк // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 13. – С. 43–61.

121. Шнюков, Е.Ф. Современные осадки и скорости осадконакопления в голоцене на черноморском шельфе УССР / Е.Ф. Шнюков, В.И. Огородников, Н.Н. Ковалюх, Н.А. Маслаков // Изучение геологической истории и процессов современного осадкообразования Черного и Балтийского морей. – Тр. Междунар. симпоз. Ч. 1. – Черное море. – Киев: Наукова думка, 1984. – С. 122–130

122. Шнюков, Е.Ф. Литолого-стратиграфическая характеристика донных отложений крымского шельфа и глубоководной части Черного моря /

Е.Ф. Шнюков, А.В. Иванников, Ю.И. Иноземцев, Г.Н. Орловский, Н.А. Маслаков, Е. Н. Рыбак, Я.К. Луцив, А.А. Парышев // Геологический журнал. – 2003. – № 1. – С. 9–23

123. Шнюков, Е.Ф. Геолого-геохимические, гидролого-гидрохимические и биологические исследования в 69-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» / Е.Ф. Шнюков, В.А. Емельянов, В.П. Коболев, А.С. Кузнецов, Т.С. Куковская // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – № 4. – С. 91–93.

124. Шуйский, Ю.Д. Процессы и скорость абразии на украинских берегах Черного моря / Ю.Д. Шуйский // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. – 1974. – № 6. – С. 108–117.

125. Шуйский, Ю.Д. Динамика береговой зоны в районах месторождений твердых полезных ископаемых / Ю.Д. Шуйский, Г.В. Выхованец, К.И. Плотникова // Основные проблемы геологии, разведки и добычи полезных ископаемых шельфовой зоны Мирового океана: Материалы респ. конф. – Киев: Наукова думка, 1982. – С. 119–127.

126. Шуйский, Ю.Д. Основные закономерности морфологии и динамики Западного берега Крымского полуостров / Ю.Д. Шуйский // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 13. – С. 62–72.

127. Шуйский, Ю.Д. Карта средней скорости абразии и аккумуляции. 1960 – 1994 гг. / Ю.Д. Шуйский, Г.В. Выхованец // Атлас охраны природы Черного и Азовского морей / Гл. ред. Л.И. Митин. – СПб.: ГУНиО МО Российской Федерации, 2006. – С. 44.

128. Шуйский, Ю.Д. Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского п-ова / Ю.Д. Шуйский // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – № 15 (15). – С. 370–385.

129. Baldock, T.E. Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone / T.E. Baldock, P. Holmes, S. Bunker, P. Van Weert // *Coastal Engineering*. – 1998. – Vol.34. Iss. 3-4. – P. 173–196. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(98\)00017-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00017-9)
130. Bakhtyar, R. Impacts of wave and tidal forcing on 3D nearshore processes on natural beaches. Part I: Flow and turbulence fields / R. Bakhtyar, A. Dastgheib, D.A. Barry // *Ocean Systems Engineering*. – 2016. – Vol. 6, iss. 1. – P. 23–60. <http://dx.doi.org/10.12989/ose.2016.6.1.023>
131. Bugajny, N. Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit) / N. Bugajny, K. Furmańczyk, J. Dudzińska-Nowak, B. Paplińska-Swerpel // *Journal of Coastal Research*. – 2013. – Vol. 65, iss. sp1. – P. 672–678. <https://doi.org/10.2112/SI65-114.1>
132. Dissanayake, P. Modelling storm-induced beach/dune evolution: sefton coast, Liverpool Bay, UK / P. Dissanayake, J. Brown, H. Karunarathna // *Marine Geology*. – 2014. – Vol. 357. – P. 225–242. [10.1016/j.margeo.2014.07.013](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.07.013)
133. Divinsky, B.V. Extreme wind waves in the Black Sea. / B. V. Divinsky, V.V. Fomin, R.D. Kosyan, Y.D. Ratner // *Oceanologia*. – 2020. – Vol. 62(1). – P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
134. Elsayed, S.M. Combined Modelling of Coastal Barrier Breaching and Induced Flood Propagation Using XBeach / S.M. Elsayed, H. Oumeraci // *Hydrology* – 2016. – 3(4). – P. 32. <https://doi.org/10.3390/hydrology3040032>
135. Ferre, B. Fine-grained sediment dynamics during a strong storm event in the inner-shelf of the Gulf of Lion (NW Mediterranean) / B. Ferre, K. Guizien, X. Durrieu de Madron, A. Palanques, J. Guillen, A. Gremare // *Continental Shelf Research*. – 2005. – Vol. 25. – P. 2410–2427. DOI:10.1016/J.CSR.2005.08.017
136. Fomin, V. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V. Fomin, K. Gurov, V. Udovik, S. Konovalov // *Materials of XXVI International Coastal Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world"*. Academus Publishing. 2016. – P. 1–1. DOI: 10.31519/conferencearticle_5b1b948b20d587.32401065 URL:

https://seacoasts.editorum.io/en/nauka/conference_article/1783/view (Date of access 24.11.2022).

137. Gallagher, E.L. Observations of sand bar evolution on a natural beach / E.L. Gallagher, S. Elgar, R.T. Guza // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – Vol. 103(C2) – P. 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>

138. Gallagher, E.L. Grain size variability on a rip-channeled beach // E.L. Gallagher, J. MacMahan, A.J H.M. Reniers, J. Brown, E.B. Thornton // *Marine Geology*. – 2011. – Vol. 287. – P. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>

139. Galappatti, G. A depth-integrated model for suspended sediment transport / G. Galappatti, C.B. Vreugdenhil // *Journal of Hydraulic Research*. – 1985. – Vol. 23. – P. 359 – 377. doi:10.1080/00221688509499345

140. Garmashov, A. Hydrometeorological monitoring in the area of the Southern coast of Crimea / A. Garmashov, Yu. Toloknov, A. Korovushkin // *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2018, Conference Proceedings, ISBN / ISSN 1314-2704, 2 July – 8 July, 2018 Albena, Bulgaria, Vol. 18, Issue 3.1, P. 379 –384.*

141. Garmashov, A. Hydrometeorological monitoring on the stationary oceanographic platform in the Black Sea / A. Garmashov, Yu. Toloknov // *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2019, Conference Proceedings, ISBN / ISSN 1314-2704, 28 June – 7 July, 2019 Albena, Bulgaria, Vol. 19, Issue 3.1, P. 259–364.*

142. Garzon, J.L. Field-based numerical model investigation of wave propagation across marshes in the Chesapeake Bay under storm conditions / J. L. Garzon, T. Miesse, C. M. Ferreira // *Coastal Engineering*. – 2019 – Vol. 146. – P. 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.11.001>

143. Gurov, K.I. The dynamics of sediments grain-size in Limensky Gulf / K.I. Gurov, V.V. Fomin // *Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*

(Editor E. Ozhan), MEDCOAST 17, 31 Oct – 04 Nov 2017, Mellieha, Malta, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Dalyan, Mugla, Turkey, 2017. – Vol. 2. – P. 925–935.

144. Gurov, K.I. Estimation of the trace metals accumulation in bottom sediments and their connection with the granulometric composition / K.I. Gurov, E.A Kotelyanets // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2018, Conference Proceedings, ISBN / ISSN 1314-2704, 2 July – 8 July, 2018 Albena, Bulgaria, Vol. 18, Issue 3.2, P. 1127–1134.

145. Gurov, K.I. Sediments granulometric composition dynamics in the Kalamitsky Gulf / K.I. Gurov, V.V. Fomin, D.V. Alekseev, E.V. Ivancha // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Editor E. Ozhan), MEDCOAST 19, 22 – 26 Oct 2019, Marmaris, Turkey, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Ortaca, Mugla, Turkey, 2019, Vol. 2 . – P. 597–606.

146. Holthuijsen, L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press: Cambridge, 2007, <http://www.cambridge.org/9780521860284>. ISBN 0-521-86028-8. XVI. – 387p.

147. Jamal, M.H. Modelling gravel beach dynamics with XBeach / M.H. Jamal, D.J. Simmonds, V. Magar // Coastal Engineering. – 2014. – Vol. 89. – P. 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.03.006>

148. Korzinin, D.V. Sediment budget and deformation of coastal profile / D.V. Korzinin // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Editor E. Ozhan), MEDCOAST 17, 31 Oct – 04 Nov 2017, Mellieha, Malta, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation, Dalyan, Mugla, Turkey, 2017. – Vol. 2. – P. 917–924

149. Krumbein, W.C. Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments / W.C. Krumbein // Journal of Sedimentary Petrology – 1936. – Vol. 6. – P. 35–47. DOI:10.1306/D4268F59-2B26-11D7-8648000102C1865D

150. Li, L. Modeling the change of beach profile under tsunami waves: a comparison of selected sediment transport models / L. Li, Z. Huang // *Journal of Earthquake and Tsunami*. – 2013. – Vol. 7, No. 1. – 1350001. DOI: 10.1142/S1793431113500012

151. Lindemer, C.A. Numerical simulation of a low-lying barrier island's morphological response to Hurricane Katrina / C.A. Lindemer, N.G. Plant, J.A. Puleo, D.M. Thompson, T.V. Wamsley // *Coastal Engineering*. – 2010. – Vol. 57 (11–12). – P. 985–995. DOI:10.1016/j.coastaleng.2010.06.004

152. McCall, R.T. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island / R.T. McCall, J.S.M. van T. de Vries, N.G. Plant, A.R. van Dongeren, J.A. Roelvink, D.M. Thompson, A.J.H.M. Reniers // *Coastal Engineering*. – 2010. – Vol. 57 – P. 668–683. DOI:10.1016/J.COASTALENG.2010.02.006

153. McCall, R.T. Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G / R.T. McCall, G. Masselink, T.G. Poate, J.A. Roelvink, L.P. Almeida // *Coastal Engineering*. – 2015. – Vol. 103. – P. 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.06.002>

154. Muller, J.R.M. Xbeach simulations of a hybrid coastal risk-reduction measure: a Galveston Seawall test case / J.R.M. Muller, J. Figlus, J.S.M. van T. de Vries // *Coastal Engineering Proceedings*. – 2018. – Vol. 1(36), papers.100. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.100>

155. Pender, D. A statistical-process based approach for modelling beach profile variability / D. Pender, H. Karunarathna // *Coastal Engineering*. – 2013. – Vol. 81 – P. 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.06.006>

156. Phillips, B.T. Modeling Impact of Intertidal Foreshore Evolution on Gravel Barrier Erosion and Wave Run up with XBeach-X / B.T. Phillips, J.M. Brown, A.J. Plater // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 8(11):914. <https://doi.org/10.3390/jmse8110914>

157. Prodger, S. Grain-size distributions on high-energy sandy beaches and their relation to wave dissipation / S. Prodger, P. Russell, M. Davidson // *Sedimentology*. – 2017. – Vol. 64. – P. 1289–1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
158. Reniers, A.J.H.M. Observations and modeling of steep-beach grain-size variability / A.J.H.M. Reniers, E.L. Gallagher, J.H. MacMahan, J.A. Brown, A.A. van Rooijen, J.S.M. van T. de Vries, B.C. van Prooijen // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2013. – Vol. 118. – P. 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>
159. Roelvink, D. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink, A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski // *Coastal Engineering*. – 2009. – Vol. 56, iss. 11–12. – P. 1133–1152. DOI:10.1016/J.COASTALENG.2009.08.006
160. Roelvink, D. XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities: Report / D. Roelvink, A. van Dongeren, R. McCall, B. Hoonhout, A. van Rooijen, P. van Geer, L. de Vet, K. Nederhoff, E. Quataert. Deltares: Delft. – 2015. – 141 p. doi:10.13140/RG.2.1.4025.6244
161. Roelvink, D. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band run up / D. Roelvink, R. McCall, S. Mehvar, K. Nederhoff, A. Dastgheib // *Coastal Engineering*. – 2018. – Vol. 134. – P. 103–123. DOI:10.1016/J.COASTALENG.2017.07.004
162. Rooijen, A.V. Modeling of wave attenuation by vegetation with XBeach / A.V. Rooijen, J.V. Vries, R. McCall, A. Dongeren, J. Roelvink, A. Reniers // *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands, 28 June–3 July 2015*. – Vol. 36. – P. 6749–6755.
163. Ruessink, B.G. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks / B.G. Ruessink, Y. Kuriyama, A.J.H.M. Reniers, J.A. Roelvink, D. J. R. Walstra // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. Vol. 112. – F03010. doi:10.1029/2006JF000730

164. Splinter, K.D. Modeling dune response to an East Coast Low / K.D. Splinter, M.L. Palmsten // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 329–331. – P. 46–57. DOI:10.1016/j.margeo.2012.09.005

165. Stelling, G.S. A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows / G.S. Stelling, S.P. Duinmeijer // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – 2003. – Vol. 43. – P. 1329–1354. DOI:10.1002/FLD.537

166. Tanner, W.F. Modification of sediment size distributions / W.F. Tanner // *Journal Sed. petrol.* – 1964. – V. 34, 1. – P.408–411.

167. Trask, P.D. Origin and environment of source sediments of petroleum / P.D. Trask // *Gulf. publ. Co.* –Houston. – 1932. – 281p.

168. Umeda, S. Analysis with Xbeach model to understand characteristics of short wave and infragravity wave on a sandbar beach / S. Umeda, H. Yamamoto, M. Yuhi, H. Mase// *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*. – 2018. – Vol. 74(2). – P. I_775-I_780. DOI:10.2208/kaigan.74.i_775

169. Van Orstrand, C.E. Note on the representation of the distribution of grains in sands / C. E. van Orstrand // *Committee on Sedimentation: Research in Sedimentation in 1924 – Natl. Res. Council.* – 1925. – P. 63–67.

170. Van Rijn, L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas / L.C. Van Rijn // *Aqua Publications: Amsterdam.* – 1993. – 715 p.

171. Van Rijn, L.C. Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales / L.C. van Rijn, P.K. Tonnon, D.J.R. Walstra // *Coastal Engineering*. – 2011. – Vol. 58, iss. 7. – P. 637–655. DOI:10.1016/J.COASTALENG.2011.01.009

172. Wentworth, C.K. Method of computing mechanical composition types in sediments / C.K. Wentworth // *Geological Society of America Bulletin*. – 1929. – Vol. 40. – P. 771–790. DOI:10.1130/GSAB-40-771

173. Williams, J.J. Modelling storm responses on a high-energy coastline with XBeach / J.J. Williams, L.S. Esteves, L.A. Rochford // *Modeling Earth Systems and*

Environment. – 2015. – Vol. 1, iss. 1–2. Article 3. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0003-8>

174. XBeach Model Description and Manual, Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. – 2010. – 106 p.

175. Yu, F. A comparison of the post-storm recovery of two sandy beaches on Hong Kong Island, southern China / F. Yu, A.D. Switzer, A.Y.A. Lau, H.Y.E. Yeung, S.W. Chik, H.C. Chiu, Z. Huang, J.A. Pile // Quaternary International. – 2013. – P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>