

На правах рукописи

ГУРОВ КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ

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

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

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

Официальные оппоненты:

Бердников Сергей Владимирович, доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», директор

Дьяков Николай Николаевич, кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», директор Севастопольского отделения

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Защита состоится **06 декабря 2023 г. в 11 ч 00 мин** на заседании Диссертационного совета 24.1.229.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: **299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте Института http://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_202309151550.html

Автореферат разослан «05» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. 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 СССР..., 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 СССР..., 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 (Вериго, 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 Просви́ров, 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; Kogzinin, 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 [6].

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 натуральных 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), [6]. 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 [6]. Особое значение точные данные о размерном составе донных наносов имеют при адаптации и валидации моделей, описывающих литодинамические процессы на участках береговой зоны [5, 6].

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, 2021a).

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 (2013–2014) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (2014–2020), а также в рамках научно-исследовательских проектов РФФИ (№ 18-35-00230, № 18-45-920007).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы представлялись на семинарах отдела биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на 13 всероссийских и международных научных конференциях.

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».

Личный вклад автора. 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, д-ру геогр. наук Е.И. Игнатову, В.Ф. Удовику, Е.И. Овсяному, д-ру геогр. наук Ю.Н. Горячкину, канд. геогр. наук Крыленко В.В., канд. физ.-мат. наук Д.В. Алексееву 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и рассмотрена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Приводится информация о теоретической и практической значимости работы, связь с научными программами, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **Главе 1** рассматриваются общие характеристики донных наносов. В *параграфе 1.1* дается информация об особенностях классификации донных наносов, используемая в работе. В *параграфе 1.2* рассмотрены факторы формирования и динамики донных наносов в прибрежных районах Крыма. Показано, что 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; Страхов, 1954; Невеский, 1967; Рухин 1969; Лисицын, 1971; Романовский, 1988).

В *параграфе 1.3* проведен анализ литературных источников, посвященных особенностям гранулометрического состава донных наносов в прибрежных районах Крыма. Показано, что донные наносы прибрежных районов Крыма представлены в основном песчаными фракциями, чередующимися с ракушечным, либо илистым материалом (Архангельский и Страхов, 1938). Как правило, пески встречаются в зоне волнового воздействия, на глубинах до 20–25 м в акватории Лименского залива (Зенкович, 1958; Геология шельфа УССР..., 1985) и до 30–50 м в Каламитском заливе (Шнюков, 2003). Согласно другим данным, в Каламитском заливе глубже 10-метровой изобаты преобладают алевритовые илы, которые залегают однородным слоем (Тримонис, 1976). Наносы Балаклавской бухты представлены мелкодисперсной фракцией в верховье бухты, в центральной части – 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 (Люция..., 1937). Согласно литературным данным отмечено, что наносы береговой зоны Каламитского залива характеризуются незначительным содержанием мелкодисперсных пелитовой и алевритовой фракций (Братусь, 1965; Шуйский, 2007). Показано, что особенности дифференциации материала наносов в зоне пляжа и в приурезовой полосе подводного берегового склона определяются местами расположения источников его поступления (Шнюков, 2003; Шуйский, 2007), характером размещения гидротехнических сооружений и направлением вдольберегового перемещения наносов (Зенкович, 1960; Иванов, 2006; Шуйский, 2007; Удовик и Горячкин, 2013, 2015).

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 в настоящее время не проводилось. Кроме того, сведения о структуре наносов, полученные ранее на отдельных точках в мористой и береговой зонах Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты, устарели, противоречивы и отрывочны, не отображают реальной картины и требуют обновления.

В **Главе 2** 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.

В *параграфе 2.1* показано, что чередующиеся между собой аккумулятивные и абразионные типы берегов – основные для Каламитского залива. В населенных пунктах отмечаются берега антропогенного типа (Зенкович, 1958, 1960; Иванов др., 2006; Современное состояние береговой зоны Крыма, 2015). Зарегулированность рек Западного Крыма и недостаточное поступление материала из местных источников привели к тому, что основное питание аккумулятивных форм рельефа на данном участке береговой зоны происходит в результате вдольберегового перемещения наносов (Зенкович, 1960; Шуйский, 2006; Удовик и Горячкин, 2013, 2015). Отмечено, что динамика вод в прибрежной зоне Каламитского залива в значительной степени определяется поверхностным волнением (Горячкин, 2009), а основное перераспределение донных наносов в данном районе происходит преимущественно под воздействием штормовых волн, имеющих направление, близкое к нормали по отношению к береговой линии (Горячкин и Репетин, 2009; Харитоновна и Фомин, 2012), [6]. На основе литературных данных 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 (Атлас волнения и ветра..., 1969; Типовые поля ветра и волнения..., 1987; Ефимов и Комаровская, 2009).

В *параграфе 2.2* показано, что 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 (Зенкович, 1958; Геология СССР..., 1969; Шнюков и др., 1984). Скальные берега восточной части состоят из глыб верхнеюрского известняка (Шестопалов, 2005). Анализ литературных источников показал, что наибольшую повторяемость для акватории Лименского залива имеют кратковременные шторма продолжительностью до 12 ч (Зац, 1966). 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 (Атлас волнения и ветра...,1969; Мониторинг прибрежной зоны..., 2014).

В параграфе 2.3 отмечено, что Балаклавская бухта представляет собой характерный ингрессионный залив риасового типа (Зенкович, 1958; Геология СССР..., 1969). 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). По данным (Репетин, 2003) 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%).

Глава 3 посвящена материалу и методам исследования гранулометрического состава наносов, а также параметрам и особенностям применения модели динамики береговой зоны (*XBeach*).

В параграфе 3.1 приводятся схемы станций отбора проб донных наносов в прибрежной зоне Каламитского залива, Лименского залива и Балаклавской бухты, а также схема расположения точек отбора проб в береговой зоне в Каламитском заливе.

В параграфе 3.2 Показано, что в настоящей работе для исследования состава крупнозернистых псамито-алевритовых и смешанных донных наносов применялся комбинированный ситовой анализ (метод декантации и рассеивания) (Петелин, 1967). 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 (Пармузина, 2011). Для моделирования динамики донных наносов на участках прибрежной и береговой зон применялась модель *XBeach* (Roelvink et al., 2009; Xbeach..., 2010; Roelvink et al., 2015). 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.

В **Главе 4** приведен анализ современных данных гранулометрического состава донных наносов в прибрежной зоне Каламитского залива, Лименского залива и

Балаклавской бухты. Выделены 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.

В параграфе 4.1 представлены результаты исследования вещественного состава донных наносов, отобранных в мористой, прибрежной и береговой частях Каламитского залива. Установлено, что донные наносы мористой части представлены ракушечным гравием с детритовым песком, а также алеврито-пелитовым и пелито-алевритовым илом (Рисунок 1, а, в). Донные наносы прибрежных районов отличаются бóльшим разнообразием, что, скорее всего, связано с источниками их питания и с гидродинамической активностью (Рисунок 1, б, г) [1].

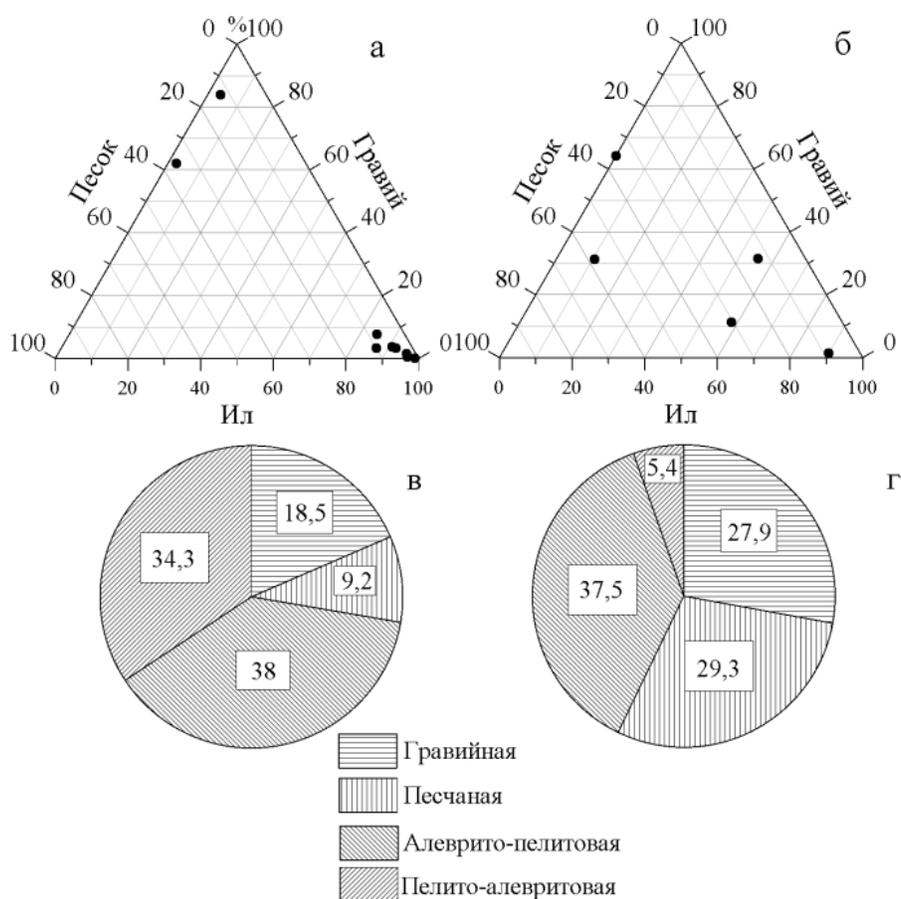


Рисунок 1 – Трехкомпонентная (а, б) и круговая (в, г) диаграммы фракционного состава донных наносов Каламитского залива в 2011 (а, в) и 2012 (б, г) гг.

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 до 24–28%, а алевритового и пелитового материала до 0,6% [5], что согласуется с литературными данными (Зенкович, 1960; Братусь, 1965а; Шуйский, 2007).

В параграфе 4.2 рассмотрены особенности гранулометрического состава донных наносов Лименского залива. Показано, что в прибрежной зоне наносы состоят из среднезернистых песков (Рисунок 2, б) с включением ракушечного материала и известнякового гравия (Рисунок 2, а), а мористая часть полигона занята алеврито-пелитовыми илами (Рисунок 2, в). Установлено, что для всех проб наносов характерна двухвершинная диаграмма содержания фракций, представленная как крупно- так и мелкозернистыми частицами. Наибольшая доля приходится на гравийную и песчаную фракции [3].

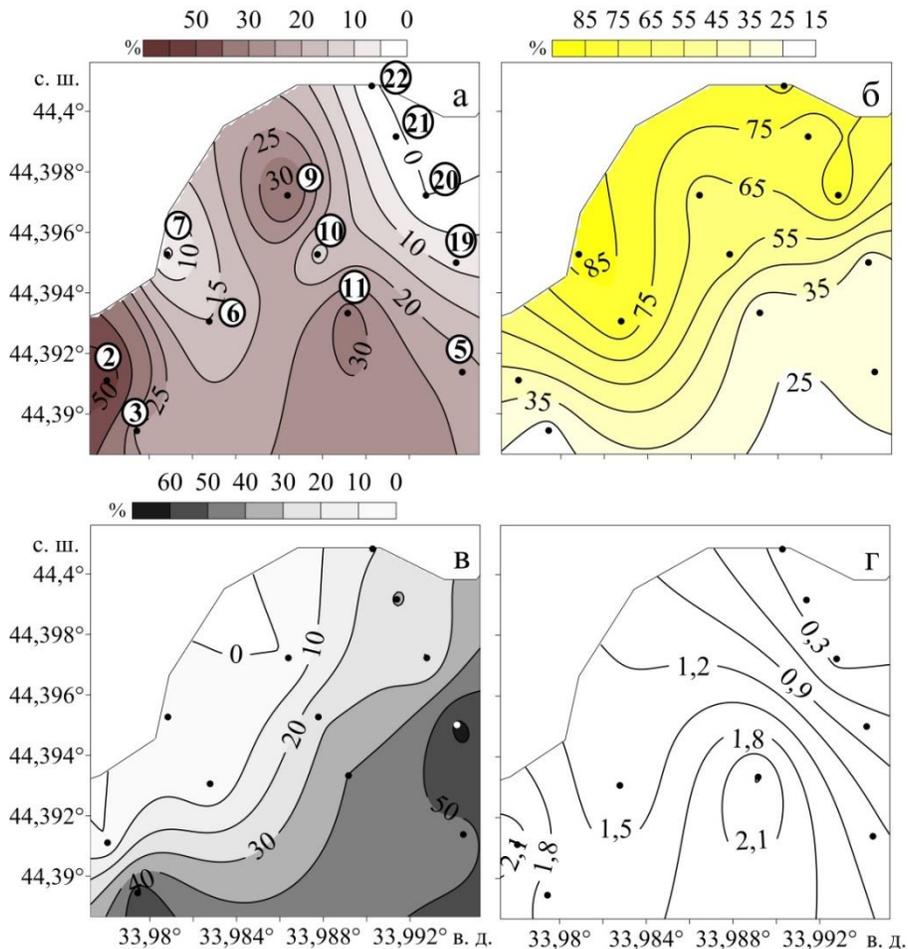


Рисунок 2 – Пространственное распределение гравийной (а), песчаной (б), алеврито-пелитовой (в) фракций и среднего диаметра частиц, мм (г) в поверхностном слое донных наносов Лименского залива; цифрами в кружочках показаны номера станций отбора проб [3]

В параграфе 4.3 показано, что донные наносы Балаклавской бухты представлены преимущественно пелито-алевритовыми и алеврито-пелитовыми илами, максимальные концентрации которых отмечались в кустовой северо-западной части северного бассейна (Рисунок 3, в). Распространение гравийной фракции в виде локальных максимумов вблизи берега определяется повышенным содержанием в этих районах ракушечного гравия и детрита (Рисунок 3, а) [2].

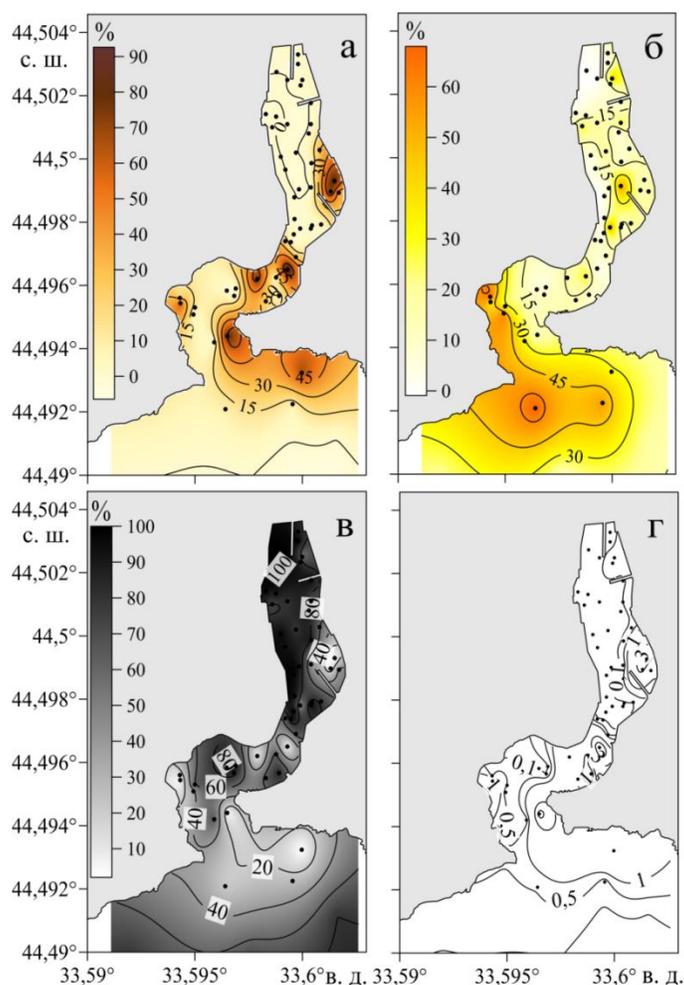


Рисунок 3 – Пространственное распределение гравийной (а), песчаной (б), илистой (в) фракций и среднего диаметра частиц, мм (г) в поверхностном слое донных наносов Балаклавской бухты в 2005–2019 гг.

В **Главе 5** с помощью методов математического моделирования проведен анализ основных особенностей динамики гранулометрических фракций донных наносов в прибрежной и береговой зонах Каламитского и Лименского заливов, а также Балаклавской бухты под воздействием ветрового волнения.

В *параграфе 5.1* представлены результаты, полученные на участках прибрежной и береговой зон Каламитского залива. Показано, что на интенсивность перемещения песчаных 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.

Анализ результатов математического моделирования для района пересыпей оз. Сасык и оз. Богайлы показал, что для всех численных экспериментов отмечается активное перераспределение более крупных фракций в верхней части подводного

берегового склона и однонаправленное перемещение мелких частиц в сторону моря (Рисунок 4, а).

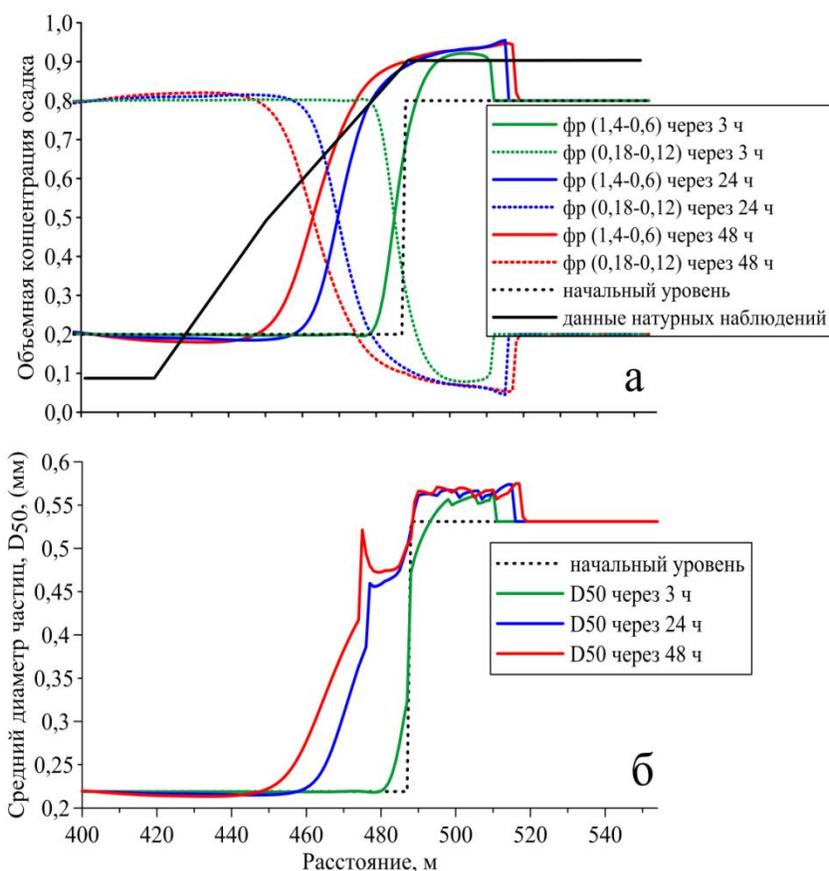


Рисунок 4 – Распределение объемных концентраций наносов (а); распределение среднего диаметра частиц (D50) (б) для профиля BC2 (состоящего из разных по крупности наносов, разделенных на две области) ($h_s = 2$ м, $\tau_p = 8$)

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 профиля (Рисунок 4, б) [6].

В параграфе 5.2 показано, что в акватории Лименского залива основное перераспределение песчаных фракций в процессе штормового воздействия происходит в течение первых 6 часов, и ограничивается изобатой 20 м (Рисунок 5).

Основными факторами, регулирующими перемещение материала, является глубина и уклон дна. Для района вблизи м. Кикинеиз показано как соотносятся изменение объемных концентраций каждой фракции и величины уклона дна. Установлено, что накопление крупнозернистого материала вблизи берега

определяется максимальными величинами уклона дна на участке 0–115 м от уреза (от 0,22 до 0,049). Незначительный рост величин уклона дна (от 0,049 до 0,056) на участке 115–175 м от уреза сопровождается увеличением концентраций мелкозернистой фракции и сокращением доли крупнозернистой (Рисунок 6). В мористой части акватории (180–500 м от уреза) с плавным изменением величин угла наклона от 0,056 до 0,053 незначительно увеличивается доля крупнозернистого материала, а мелкозернистого – уменьшается.

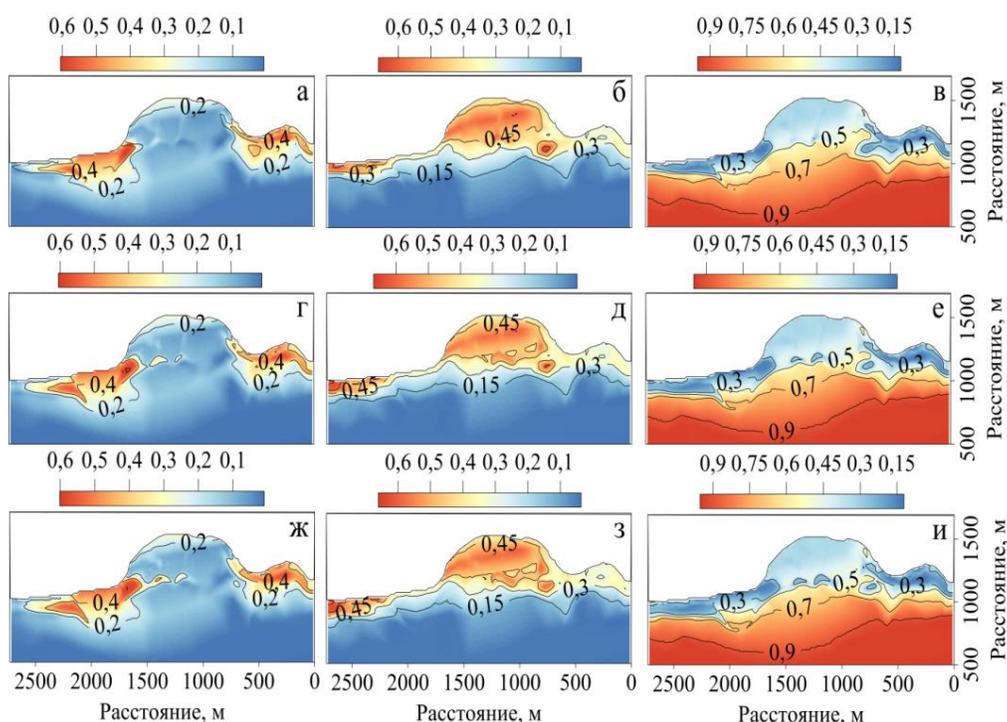


Рисунок 5 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой (а, г, ж); среднезернистой (б, д, з); мелкозернистой (в, е, и) гранулометрических фракций при $t = 12$ ч для $h_s = 3,6$ м (а, б, в), 4,5 м (г, д, е) и 5,1 м (ж, з, и)

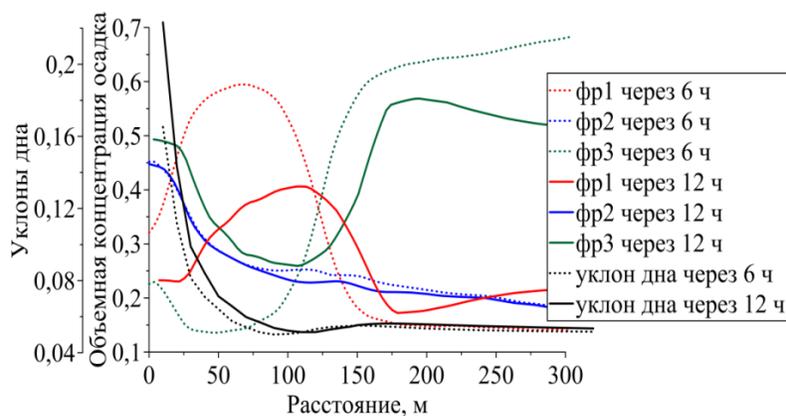


Рисунок 6 – Особенности перераспределения гранулометрических фракций и динамика угла наклона дна для южного волнения, $h_s = 5$ м

В параграфе 5.3 показано, что основными факторами, регулирующими перемещение материала в акватории Балаклавской бухты, являются глубина и уклон дна. Отмечено, 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. Установлено, что, несмотря на изолированность северной кутовой части Балаклавской бухты от волнения открытого моря, под воздействием штормов в северном бассейне наблюдается незначительная динамика песчаного материала. Отмечается перераспределение фракций донных наносов от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу бухты (Рисунок 7). 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 и 10–12 – к осаждению уже мелкозернистого песка [11].

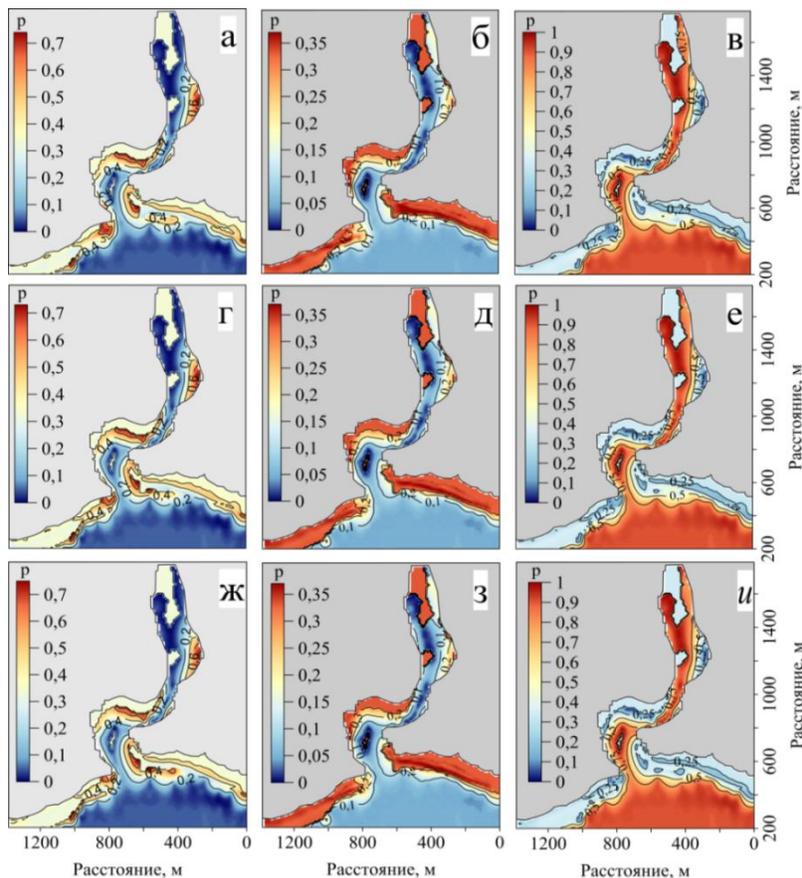


Рисунок 7 – Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой (а, г, ж); среднезернистой (б, д, з); мелкозернистой (в, е, и) фракций при $t = 12$ ч для волнения юго-юго-восточного (а, б, в), южного (г, д, е) и юго-юго-западного (ж, з, и) направлений [11]

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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, регулирующими перемещение материала, являются 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.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Гурова Константина Игоревича

Подписано к печати 25 сентября 2023 г.

Объем 0,9 п.л.

Заказ № 19

Формат бумаги 60×84 1/16

Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055

г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143

Тел.: +7 (8692) 65-60-11

cpdi@rambler.ru