

На правах рукописи



ЗДОБИН Дмитрий Юрьевич

**МОРСКИЕ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫЕ ГРУНТЫ.
УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, СОСТАВ, СТРОЕНИЕ,
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург
2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Официальные оппоненты:

Вознесенский Евгений Арнольдович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Козлов Сергей Александрович – доктор геолого-минералогических наук, главный геолог ФГУНПП «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (ПМГРЭ).

Иванов Геннадий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора по науке ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга»

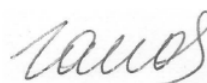
Защита диссертации состоится 13 апреля 2017 г. в 15.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Российский государственный геологоразведочный университет, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.121.01.

Автореферат разослан января 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент



С.Д. Ганова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Морские донные грунты – илы – одни из трех видов органо-минеральных грунтов выделяемых в качестве самостоятельных таксонов в общей классификации дисперсных связных грунтов. Несмотря на длительный период их изучения многие вопросы формирования состава, строения и свойств этого вида грунта, а также вопросы частных инженерно-геологических классификаций до сих пор остаются предметом дискуссии.

Изучение закономерностей формирования физико-химических свойств морских органо-минеральных грунтов – илов, их гранулометрического, химического и минерального состава, особенностей микростроения, анализ пространственной изменчивости распространения различных видов органо-минеральных грунтов крайне актуально с позиций теоретического естествознания и одного из разделов инженерной геологии – генетического грунтоведения.

Вопросы, рассматривающие стадийность процессов формирования физико-химических свойств морских глинистых грунтов относятся к фундаментальным проблемам современного грунтоведения. Стадия седиментогенеза, в ряду седиментогенез – диагенез (ранний и поздний) – литогенез – катагенез, наиболее значима, так как минеральный состав, наличие биотической составляющей и физико-химические условия структурообразования определяют в последующем характер любых трансформаций в грунте. К настоящему времени трудами В.А.Приклонского, В.И.Савельева, В.Д.Ломтадзе, И.М.Горьковой, В.И.Осипова построена двухкомпонентная (твердая и жидкая) модель формирования глинистого осадка, в основе которой лежит физико-химическая механика дисперсных сред. Весь процесс (до текучих глин) разбит на четыре стадии: структурообразования, коагуляции, агрегации и физико-химического уплотнения. Однако в природных условиях данная модель не полностью соответствует естественным реалиям, так как не учитывает такой важнейший компонент грунта как органическое вещество. До настоящего времени различные аспекты физико-химических свойств морских органо-минеральных грунтов – илов, а именно они в подавляющем большинстве представляют новейшие отложения рассматриваемых регионов, с позиций генетического грунтоведения практически не изучались.

Таким образом, главной задачей проведенных исследований стало комплексное изучение морских органо-минеральных грунтов для выяснения вопросов формирования их физико-химических свойств. Инженерно-геологические исследования проводились в различных районах континентального шельфа России: Охотское море (заливы Анива, Терпения, Северо-охотоморский прогиб), Белое море (Кандалакшский залив), море Лаптевых (залив Нордвик и бухта Моржовая).

Цель работы. Целью работы явилось установление основных закономерностей формирования и вертикальной изменчивости гранулометрического, минерального, химического состава, физических и физико-химических свойств морских органо-минеральных грунтов – илов и построения схемы стадийности формирования глинистых осадков в присутствии органического вещества.

Основные задачи исследования. В соответствии с целью работы решались следующие задачи:

- изучение геологического и инженерно-геологического строения верхней части разреза отложений шельфа Охотского, Белого моря и моря Лаптевых.
- изучение гранулометрического, минерального, химического состава и физико-механических свойств морских органо-минеральных грунтов.
- установление особенностей микростроения и закономерностей пространственной изменчивости физико-химических свойств илов.
- анализ режима вертикальной изменчивости вещественного состава и свойств чехла голоценовых илов.
- выяснение стадийности образования и формирования физико-химических свойств глинистых грунтов в присутствии органического вещества.

- составление общей и частных классификаций органо-минеральных грунтов.

Использованный фактический материал. В основу работы положены материалы морских, полевых и камеральных инженерно-геологических исследований выполненных на акватории Охотского моря (1987-1992 гг.), на акватории Кандалакшского залива Белого моря (1996-2013 гг.), прибрежно-морских отложений моря Лаптевых (2008-2009 гг.) при непосредственном участии автора. В процессе исследований проанализировано около 600 картировочных скважин пробуренных в изучаемых регионах. Для характеристики органо-минеральных грунтов было проведено их комплексное изучение, включавшее в себя около 2700 определений и расчетов основных показателей физико-механических свойств. В ходе исследований привлекались данные гранулометрического, химического, биохимического и рентгеноструктурного анализов, данные электронной микроскопии.

Научная новизна. Научную новизну результатов проведенных исследований можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые изучено инженерно-геологическое строение верхней части разреза шельфа заливов Анива, Терпения Охотского моря, а также Северо-охотоморского шельфа, прибрежно-морских отложений моря Лаптевых, прибрежно-морских равнин и бухтовых отложений Кандалакшского залива Белого моря.

2. Впервые детально исследован комплекс физических, физико-химических и механических свойств основных типов голоценовых морских шельфовых илов Охотского моря, прибрежно-морских илов приливных равнин моря Лаптевых, бухтовых илов Белого моря. Выявлены новые закономерности формирования физико-химических свойств илов в зависимости от глубины седиментационного бассейна.

3. Выяснены статистические параметры распределения ряда глинистых минералов илов в зависимости от глубины акватории и местонахождения их в толще грунта. Установлены ранее неизвестные диагенетические трансформации глинистых минералов (система гидрослюда-монтмориллонит) на ранних стадиях седиментогенеза.

4. Установлены новые закономерности формирования физико-химических свойств илов шельфа заливов Анива, Терпения, Северо-охотоморского шельфа Охотского моря, прибрежно-морских глинистых илов моря Лаптевых, бухтовых илов Кандалакшского залива Белого моря.

5. Выявлен и описан новый вид органических грунтов – морской фитолит.

6. Предложена новая схема формирования физико-химических свойств органо-минеральных грунтов в присутствии органического вещества.

7. Предложен универсальный показатель трансформации осадка.

8. Разработаны новые частные инженерно-геологические классификации органо-минеральных грунтов.

Для изученных органо-минеральных грунтов определены седиментологические, минералогические, геохимические, физико-химические, биохимические характеристики, которые позволили установить этапы и особенности накопления данного вида грунтов. На основе анализа парагенезов и кристаллохимических характеристик глинистых минералов органо-минеральных грунтов реконструированы условия их формирования на начальных стадиях седиментации.

Проведено сравнение характера осадконакопления и постседиментационных преобразований грунтов на различных шельфах Российской Евразии: Белое, Лаптевых, Охотское моря.

Отличительной особенностью работы является единый методический подход, рассматривающий все изученные объекты последовательно, начиная от стадии накопления осадков и начала формирования грунтов, до стадии постседиментационных преобразований.

Анализ литературного материала и детальные грунтоведческие исследования шельфовых илов Кандалакшского залива Белого моря, позволили существенно дополнить

процесс формирования глинистых грунтов в присутствии органического вещества и выйти на общую схему формирования грунтов данного типа.

Установлено определяющее влияние W_e , W_L и $C_{орг}$ на стадийность осадконакопления глинистых и органо-минеральных грунтов. Именно соотношение этих параметров в грунтовой массе позволили выделить девять стадий формирования илов: от попадания минеральной частицы в седиментационный бассейн до стадии текучих глин. Определено начало перехода грунта из трёхкомпонентной системы (твёрдая, жидкая и органическая) в четырёхкомпонентную (появление газообразной). Предложена граница раздела «седиментогенез – диагенез».

В результате проведенного комплексного изучения минерального, гранулометрического составов, физико-химических, физико-механических, химических и биохимических свойств и сравнительного анализа прибрежно-морских и морских органо-минеральных грунтов шельфа морей севера и востока Евразийской России (Белое, Лаптевых, Охотское моря), сформулированы следующие защищаемые положения.

Основные защищаемые положения:

1. Органическое вещество (ОВ) для органо-минеральных грунтов, является определяющим фактором процесса осадконакопления, формирования состава и свойств. Формирование физико-химических свойств, типов контактов и типа структуры морских органо-минеральных грунтов – илов полностью контролируется трансформацией их ОВ при диагенезе, а роль других многочисленных факторов (рН, Eh, преобладающий тип глинистых минералов, гранулометрический и химический составы и т.д.) различны на разных стадиях этого процесса.

2. На стадии седиментогенеза ОВ является катализатором коагуляции глинистых частиц и микроагрегатов. Тип микростроения морских органо-минеральных илов – ячеистая коагуляционная микроструктура. Тип структурных связей – дальние коагуляционные контакты. Дальние коагуляционные контакты (ДКК) сменяют ближние коагуляционные контакты (БКК) только при переходе влажности грунта от $W_e > W_L$ к $W_e < W_L$. Граница $W_e = W_L$ является границей между седиментогенезом и диагенезом. При этом влажность грунтовой толщи достигает W_L ($W_e = W_L$) при пороге концентрации ОВ <3%.

3. Морские шельфовые органо-минеральные грунты – локально-фациальные образования. Закономерности формирования пространственной изменчивости состава и физико-химических свойств илов контролируются двумя основными факторами: 1) геолого-географическими условиями осадконакопления (геологическое строение сопредельной суши, характер и распределение терригенного стока, гидродинамический режим бассейна седиментации, биологическая продуктивность вод и ледовая обстановка); 2) характер и направленность диагенетических преобразований в илах (изменение структурной прочности и гидрофильности, трансформация ОВ, глинистых минералов).

4. Изучение минерального состава илов выявило его непостоянство по вертикали грунтовой толщи. На начальных стадиях седиментогенеза в условиях полярного литогенеза отмечаются следующие диагенетические изменения глинистых минералов: соотношения «гидрослюда-монтмориллонит» – уменьшение содержания монтмориллонита и «гидрослюда-смешаннослойные» – начало трансформации смешаннослойных в диоктаэдрический хлорит.

Личный вклад автора. В диссертационной работе приводятся результаты многолетних исследований, выполненных лично автором, при его участии, или под его руководством. Автору принадлежат: выбор направления исследования и постановка проблемы, аналитический обзор литературы, разработка обобщенной концепции формирования глинистых грунтов шельфа в присутствии органического вещества, теоретических, методологических и методических положений оценки состояния органического вещества в морских органо-минеральных грунтах, постановка, руководство и участие в исследованиях по апробации теоретических и методологических положений, формулировка выводов. Результаты разработок, проведенных в соавторстве с другими исследователями, и

касающиеся в основном апробации ряда положений диссертации на конкретных участках, включены в диссертацию только при наличии совместных публикаций.

Практическая значимость. Результаты инженерно-геологического изучения илов послужили обустройству морских газоконденсатных месторождений на шельфе Охотского моря (безопасная постановка на точку бурения плавучих буровых установок и ледостойких добычных платформ), оценке физико-механических свойств илов для дальнейшего проектирования морских геологоразведочных работ на шельфе моря Лаптевых. Особенности состава, строения, условий формирования и физико-механических свойств органо-минеральных грунтов послужили основой для нового определения термина «ил» и частных инженерно-геологических классификаций органо-минеральных грунтов – заторфованных грунтов, илов и сапропелей.

Термины «ил» и «сапропель», а также частные инженерно-геологические классификации илов и сапропелей полностью вошли в государственный общедеревянный классификационный стандарт ГОСТ 25100-11 «Грунты. Классификация».

Результаты исследований автора по органо-минеральным грунтам позволили создать новый актуализированный ГОСТ 23740-16 «Грунты. Методы определения содержания органического вещества». Исследования гранулометрического состава и физико-механических свойств морских органо-минеральных грунтов – илов стали составной частью разработанных новых ГОСТ «Грунты. Метод определения липкости» и ГОСТ «Грунты. Методы лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации».

Полученные результаты используются автором при чтении лекций и проведения практических занятий бакалаврам, магистрам и специалистам по курсу «Грунтоведение» и «Инженерная геология» в Санкт-Петербургском государственном университете.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе обосновывается научным анализом большого объема результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также реальной инженерно-геологической обстановки на полевых объектах, где проводились грунтоведческие исследования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях ДМИГЭ (Южно-Сахалинск, 1987-1994), НПО «Союзморинжгеология» (Рига, 1987-1994), «ВНИИМоргео» (Рига, 1987-1994), ВНИИОкеангеология (1993), Международных конгрессах ICAM (Магадан, 1998, Йель, 2002), съездах Минералогического общества (Санкт-Петербург, 1998, 2010), международном совещании «Рентгенография минералов» (Санкт-Петербург, 1999), международном конгрессе «Euroslay» (Варшава, 1999), Международных симпозиумах «Биокосные взаимодействия» (Санкт-Петербург, 2002, 2004, 2007), Всероссийского совещания по органической минералогии (Петрозаводск, 2005), международных семинарах «Минералогия и жизнь» (Сыктывкар, 2002, 2007), V-VII Всероссийских литологических совещаниях (Екатеринбург, 2008, Казань, 2011, Новосибирск, 2013), 33 международном геологическом конгрессе (Осло 2008), XVIII-XXI Международных конференциях (школах) по морской геологии (Москва, 2009, 2011, 2013, 2015), XII-XVII «Сергеевских чтениях» (Москва, 2010-2015), Международном симпозиуме по инженерной геологии «Инженерная защита территорий и безопасность населения» (Engeopro-2011), Международном конгрессе по инженерной геологии IAEG-XXII (Италия, 2014), 1-3 всероссийских научно-практических конференций «Полевые и лабораторные методы изучения свойств грунтов (Москва, 2013-2015), VI-XIX Общероссийских научно-практических конференциях «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2008-2015), научных семинарах геологического факультета СПбГУ, заседаниях Русского географического общества (2008) и Охотинского общества грунтоведов (2005-2015).

Публикации. Диссертант является автором или соавтором 105 публикаций. По теме диссертации опубликовано 58 работ. Основные результаты диссертационного исследования изложены в статьях, опубликованных в журналах «Геоэкология»,

«Инженерная геология», «Инженерные изыскания», «Тихоокеанская геология», «Грунтоведение», «Вестник СПбГУ», «Бюллетень МОИП».

Структура и объем работы. Диссертационная работа объемом 584 страницы машинописного текста состоит из введения, 6 глав и заключения. Работа проиллюстрирована 136 рисунками и 82 таблицами. Список использованных источников включает 285 наименований.

Благодарности. Эта работа никогда не была бы написана без постоянного спокойного и осознанного понимания всего происходящего со стороны Ларисы Константиновны Семеновой, супруги, коллеги и ангела-хранителя.

Особые сердечные слова благодарности хочется адресовать Учителю – Надежде Петровне Иваниковой. Только ей я обязан скрупулезному и крайне тщательному подходу к изучению физико-механических свойств грунтов.

Также моя благодарность лучшему другу, Сергею Николаевичу Мироничеву («Трест ГРИИ», Санкт-Петербург), который верил всегда и вопреки всему. Очень многое дали автору беседы с И.П. Ивановым (НМСУ «Горный»), Е.Н. Коломенским, В.Я. Калачевым, В.Н. Соколовым, В.А. Королевым (МГУ), В.А. Усовым (СПбГУ), В.В. Дмитриевым (МГРИ-РГГУ), М.С. Захаровым (СПбГАСУ). Жесткую и ответственную школу морской инженерной геологии автор прошел в ДМИГЭ под руководством В.В.Кириенко, уроки которого запомнил на всю жизнь. Искреннюю благодарность автор выражает В.В. Ильину, А.И. Гордину (ДМИГЭ, Южно-Сахалинск), В.Г. Шлыкову (МГУ, Москва), А.П. Валпетер (ВНИИморгео, Рига), С.Н. Лесовой (СПбГУ) за большую помощь, консультации и ряд важнейших замечаний по поводу достоверности найденных решений. Слова признательности следует адресовать: М.В. Кнатько (НТЦ «Технологии XXI века») – за возможность спокойно работать; Б.В. Березко и В.В. Чиликину, (ДМИГЭ, Южно-Сахалинск), а также экипажам судов ИГС «Диабаз», НИС «Триас», СС «Атлас» – за полевые, лабораторные и камеральные работы на шельфе Охотского моря; доценту к.б.н. М.В. Иванову (СПбГУ) – за помощь в полевых работах на Белом море; профессору А.К. Худолею (СПбГУ), к.г.-м.н. В.В. Вержбицкому (ИО РАН), к.г.-м.н. М.А. Рогову, д.г.-м.н. М.И. Тучковой (ГИН РАН) – за помощь в полевых работах на море Лаптевых; профессору Г.А. Черкашову (ВНИИОкеангеология) – за помощь в получении материалов по Южно-Китайскому морю; Ю.Ю. Соколовой (ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ) – за предоставленные результаты исследований по Баренцеву и Азовскому морям. Хочется отдать должное отменному качеству графики: рисункам, выполненным К.А. Петряевой с присущей ей талантом и вкусом, а также чертежам И.А. Дмитриева. Высокопрофессиональную корректуру рукописи осуществила заведующая редакцией журнала «Грунтоведение» Юлия Юрьевна Соколова.

Глубокая признательность автора сотрудникам биостанции СПбГУ «Свирская» и жителем деревни Заостровье Лодейнопольского района Ленинградской области, рядом с которыми он жил и работал зимой 2001-2002, когда окончательно сложилась идея и структура работы; протоиерею Алексею Самойлову (Храм Успения Пресвятой Богородицы подворья Козельской Свято-Введенской Оптиной пустыни в Санкт-Петербурге) – за долгие вечерние беседы. Искренняя благодарность моим друзьям и коллегам: зоологу А.Э. Фатееву (Морская биологическая станция СПбГУ), инженеру-геологу А.А. Свертилову (НИОСП им. Герсеванова), геологу Д.В. Назарову (СПбГУ), юристу П.В. Пакутину (Уфимская коллегия адвокатов, Уфа), археологу М.А. Юшковой (ИИМК РАН), Н.А. Кутеню (США), И.А. Матвеевой (Латвия), сотрудникам кафедр динамической и исторической геологии геологического факультета СПбГУ; кафедрам зоологии беспозвоночных, гидробиологии и почвоведения биолого-почвенного факультета СПбГУ, лабораториям географии почв, химии и физики почв, зоологии беспозвоночных Биологического института СПбГУ (г. Петергоф).

Особая признательность автора лидеру российского грунтоведения, доктору геолого-минералогических наук, профессору, академику РАН, первому президенту Охотинского общества грунтоведов Виктору Ивановичу Осипову.

Следует отметить заметное влияние в области морской геологии идей А.П. Лисицина, П.Л. Безрукова, Н.М. Страхова, Н.В. Логвиненко, В.Т. Фролова, М.Д.Кравчишиной и других литологов, седиментологов и океанологов. Взгляд автора на генетическое грунтоведение, как науку геологического цикла, сформировался при пристальном изучении работ П.А. Земятченского, М.М. Филатова, П.А. Приклонского, Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Р.И. Злочевской, И.П. Иванова, М.П. Лысенко, И.М. Горьковой.

Определяющими в грунтоведческом мировоззрении автора стали труды выдающегося русского ученого, основоположника генетического грунтоведения (1923 г), профессора Вениамина Васильевича Охотина.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние вопроса

В главе проведен обзор современного состояния вопроса инженерно-геологического изучения морских органо-минеральных грунтов.

В нашей стране над проблемой работают и работали В.Е. Тимонов, Н.И. Андрусов, А.Д. Архангельский, М.В. Кленова, Н.М. Страхов, Л.Б. Рухин, П.Л. Безруков, Л.Н. Лисицин, А.А. Шпиков, Н.В. Логвиненко, В.Т. Фролов, В.Н. Шванов, А.А. Чистяков, О.В. Япаскерт, М.А. Левитан, А.Е. Бабинец, В.А. Емельянов, А.К. Блат, И.П. Зелинский, Е.Г. Конилов, В.М. Воскобойников, М.Ф. Ротарь, Ю.Б. Леонов, Л.В. Ищенко, А.С. Тримонис, А.И. Барковская, В.П. Воробьев, П.С. Димитров, Р.Г. Чигрин, В.М. Сорокин, С.Ю. Лебедев, Г.И. Иванов, К.И. Джанджгава, И.М. Буачидзе, Я.Ф. Хачапуридзе, Г.Е. Яшвили, М.Н. Мургулия, В.П. Шевченко, М.Д.Кравчишина, В.П. Усенко, Ю.И. Иноземцев, Л.З. Ганичева, В.В. Ковалев, М.А. Спиридонов, А.Е. Рыбалко, И.И. Гриценко, И.Л. Дзилна, А.Ю. Шехтер, А.П. Валпетер, М.В.Шпетатенко, С.Ф. Мануйлов, Н.Е. Невеский, С.В. Медведев, М.Д. Кравчишина и другие ученые.

Проанализированы результаты исследований прибрежно-морских грунтов (илов) шельфа регионов Российской Федерации в период от первых пионерных исследований до настоящего времени. В исторической ретроспективе, выявлены основные этапы в истории изучения геологического и инженерно-геологического строения регионов исследований (Охотского, Белого и Лаптевых морей). Анализ архивных материалов, фондовых и литературных источников показывает, что изучение каждого моря нашей страны укладывается в пять этапов: географический, гидрографический, океанологический, геологический и инженерно-геологический. Причем, если в морях омывающих европейскую часть России эти этапы проходили в целом последовательно, то по мере удаленности на север и восток три последние этапа проходили одновременно, накладываясь друг на друга.

Вопросами изучения физико-механических свойств текучих глинистых и органо-минеральных грунтов занимались В.В. Охотин, В.А. Приклонский, Е.М. Сергеев, В.И. Савельев, И.М. Горькова, Г.В. Сорокина, В.Д. Ломтадзе, А.К. Ларионов, И.П. Иванов, Л.Б. Розовский, Я.В. Неизвестнов, И.С. Комаров, В.И. Осипов, А.С. Поляков, В.Н. Соколов, Р.Э. Дашко, В.А. Королев, М.С. Захаров, С.А. Козлов, А.А. Свертилов, В.Е. Вознесенский, В.Г. Зайончек, Н.Г. Корвет, Н.А. Кутень и другие.

Анализ литературы показывает, что, несмотря на многолетние исследования, предлагаемые решения вопроса формирования состава, строения и физико-химических свойств илов далеки от полноты и содержат много дискуссионных моментов. Слабо изучено влияние органического вещества на структурирование осадка, в самых общих чертах известно о типе микростроения илов, возможных трансформационных изменениях глинистых минералов на стадии седиментогенеза, проблема соотношения фаз и компонент в дисперсном связном грунте. Недостаточно информации о характере, направленности и амплитуде вертикальной изменчивости параметров илового горизонта приповерхностной толщи донных грунтов. То же относится и к закономерностям пространственного распределения физико-химических свойств илов по латерали, в том числе, в неизученных в этом отношении регионах (Охотское и Лаптевых морях). Критический анализ эволюции взглядов на седиментационные и постседиментационные преобразования дисперсных

грунтов, и современные представления на эту проблему показывают серьезный недоучет вклада органического вещества в процесс осадкообразования.

Глава 2. Геологическая характеристика регионов исследований

В главе подробно освещено геологическое строение отдельных регионов окраинных морей, где проводились инженерно-геологическое изучение донных грунтов. Охотское море – Северо-охотоморский прогиб, заливы Анива и Терпения, Белое море – Кандалакшский залив, море Лаптевых – залив Нордвик и шельф восточного Таймыра.

Геологическое строение территории – важнейшая основа для понимания эволюции земной коры (включая стратиграфию четвертичных отложений, характер, амплитуду и направленность неотектонических процессов, и современные геологические явления). Именно геологические факторы определяют не только облик современных морских органико-минеральных грунтов, но и дают проецировать во времени эволюцию физико-химических свойств грунтов.

Игнорирование геологических процессов в формировании состава, строения и физико-механических свойств любого типа, вида и разновидности грунта в привязке к региональному фактору (в данном случае геологического строения территории) ведет с одной стороны, к ошибочным построениям, неверным выводам и неправильной оценке вклада любой фазы грунта в его формирование, а с другой стороны, заведомое зауживание вопроса не позволяет комплексно рассмотреть исследуемый объект земной коры.

Охотское море. Северо-охотоморский прогиб расположен в зоне сочленения структур северного Приохотья, входящих в тектономагматическую систему северного обрамления Охотского моря и Охотоморскую плиту. Северо-охотоморский прогиб, как самостоятельная тектоническая единица имеет сложное структурно-блоковое строение и резко дифференцированное распределение мощности слоистой толщи. Породы акустического фундамента (K_2-P) залегающие на глубине 3000 м. представлены вулканогенными образованиями – туфами с прослоями туффитов, туфопесчаников, туфоалевролитов и туфоконгломератов. Олигоцен-эоценовые (P_{1-2SO}) отложения - терригенные бескарбонатные породы. Переслаивание конгломератов и черных аргиллитов. Миоценовые отложения ($N_{1od} - N_{1mg}$) – литологическая толща опок и опоковидных пород с углями. Плиоценовые образования (N_2^2) представлены диатомитами, диатомитовыми глинами, опоковидными аргиллитами. Верхняя часть разреза выполнена слоболитифицированными песчано-глинистыми образованиями. Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены полным литологическим спектром от грубообломочных разностей до илов.

Морское дно залива Терпения является кайнозойским прогибом и имеет очень сложное тектоническое строение. Мезопалеозойский фундамент разбит на отдельные блоки, имеющие различную амплитуду и перемещение. Геологические разрезы прогиба залива Терпения позволяют выделить три структурных этажа. Нижний структурный этаж отождествляется с акустическим фундаментом, и сложен морскими терригенными (аргиллиты, алевролиты, песчаники) образованиями верхнемелового возраста (K_2). Средний структурный этаж залегают на подстилающих образованиях верхнего мела и сложен палеогеновыми породами (P). Это конгломераты, песчаники алевролиты. Верхний структурный этаж, залегающий с резким угловым несогласием сложен образованиями миоценового и плиоценового возрастов (N_1-N_2), и представлены кремнистыми аргиллитами и алевролитами, туфами, туффитами, песчаниками, алевролитами и глинами. Слоистые образования четвертичного возраста представлены песками, супесями, суглинками, глинами и илами.

Залив Анива расположен в пределах обширного синклинального прогиба, границами которого являются крупные региональные разломы. Прогиб заполнен толщей неогеновых и четвертичных отложений. Миоцен-плиоценовые породы (N_1-N_2) представлены мощной (2000 м.) толщей терригенно-морских песчано-глинистых отложений. Это переслаивание песчаников, глин, алевролитов и аргиллитов. Четвертичные образования различной мощности распространены повсеместно. Они залегают с угловым и стратиграфическим

несогласием на подстилающих породах и представлены морскими и прибрежно-морскими песками, супесями, глинами и илами.

В геологическом строении суши и акватории **Белого моря** принимают участие два комплекса пород. Непосредственно на кристаллических гранито-гнейсах архейского возраста залегают четвертичные рыхлые песчано-глинистые отложения. В основном они представлены комплексом осадков последнего оледенения, которое занимало рассматриваемую территорию с конца плейстоцена до начала голоцена. Меньшие площади занимают образования послеледникового времени, к которым относятся осадки морских трансгрессий, современных озер, рек и болот. Ледниковые образования представлены двумя генетическими видами: основной мореной, а также водно-ледниковыми отложениями ледниковых озер и протоков.

Четвертичные отложения распространены повсеместно, но не имеют выдержанной мощности слоев и неоднородны по составу. Причиной этого является неровная поверхность ложа древних кристаллических пород, а также различный генезис этих образований. Максимальная мощность осадков отмечается в депрессиях палеорельефа, а минимальная на склонах и вершинах возвышенностей. В стратиграфии рассматриваемого региона принимают участие отложения верхнего плейстоцена и среднего голоцена. Верхний плейстоцен – Q_{III} представлен ледниковыми (основная морена – gl_{III}) и позднеледниковыми (водноледниковыми) отложениями в объеме озерно-ледниковых (lgl_{III-IV}) и флювиогляциальных отложений – fgl_{III-IV} . Средний голоцен (послеледниковые отложения) представлен морскими (m_{IV}), озерными (l_{IV}), аллювиальными (al_{IV}) и торфяно-болотными отложениями (b_{IV}).

Основной чертой геоморфологии рельефа является выдержанность ориентировки крупных орографических элементов: на северном побережье (Кольский п-ов) они вытянуты в северо-западном направлении, на южном (в Карелии) в северо-северо-западном. На севере особенно отчетливо видно чередование повышенных и пониженных полос, к юго-востоку рельеф упрощается, становится менее расчлененным. Если на севере преобладают средние и низкие горы, то южнее, в Карелии, они сменяются холмистыми и плоскими равнинами. Северо-западное простираение свойственно не только рельефу суши, но очертаний береговым линиям Мурманского и Кандалакшского берегов. В том же направлении вытянута осевая часть Белого моря с наибольшими глубинами, Кандалакшская и Двинская губы. По южному и северному берегам Кандалакшской губы проявляется широтное направление водоразделов, речных долин и мелких фьордовых заливов. Отличительной особенностью территории является широкое развитие денудационных форм рельефа, преобладают денудационные равнины, прикрытые маломощным плащом четвертичных отложений. Повсеместно выходят на поверхность скальные коренные породы, обнаженные скалы-варакки особенно распространены на островах Кандалакшского залива. Пестрый литологический состав пород определил широкое развитие избирательной (селективной) денудации. Повсеместно встречаются массивы и гряды, сложенные более стойкими к выветриванию породами.

Характерной чертой скульптуры данного региона Балтийского щита являются свежие следы ряда оледенений. На берегах заливов и губ особенно отчетливо проявились процессы ледниковой экзарации, также многочисленны аккумулятивные ледниковые и водно-ледниковые образования: моренные гряды, озы, камы, флювиогляциальные дельты и друмлины. Характерным элементом рельефа являются морские террасы, связанные с серией трансгрессий и регрессий послеледникового моря.

Основными рельефообразующими факторами дневной поверхности являются: тектоника и избирательная денудация дочетвертичного периода и экзарационная и аккумулятивная деятельность ледника в четвертичное время. Разрывные нарушения и складкообразовательные процессы, интенсивно проявившиеся в архейском и протерозойском периоде, создали первичные формы горно-холмистого рельефа.

Море Лаптевых. Строение дна моря Лаптевых реконструировано в процессе геологического и структурно-тектонического изучения окаймляющего его южного

побережья, а также расположенных в пределах его акватории островов и данных морской сейсморазведки. Все южное побережье моря Лаптевых складывается породами покровно-складчатого Верхояно-Чукотского пояса, а также четвертичными отложениями дельты Лены и запада Яно-Индибирской низменности. В самом общем виде породы верхоянского комплекса сложены каменноугольно-юрскими терригенными ассоциациями пород. Около побережья моря Лаптевых они слагают субмеридиональный Верхоянский мегантиклинорий. По данным морской сейсморазведки в море Лаптевых установлено от 0,5 до 8 - 12 км осадочных пород мел-кайнозойского возраста. На горстовых поднятиях их мощность сокращается до 1 - 1,5 км.

Геологическое строение *мыса Цветкова* определяется его принадлежностью к зоне сочленения Таймырской складчато-надвиговой системы и Енисей-Хатангского прогиба. Береговые обрывы (активные клифы) побережья моря Лаптевых от мыса Цветкова до устья реки Короткой сложены терригенными породами пермского, триасового и юрского возраста, преимущественно моноклинального залегания (углы падения от 70 до 25⁰) и разной степени деформируемости. Разрез, являющийся опорным для севера средней Сибири, характеризуется наличием малоамплитудных разрывных нарушений взбросо-надвиговой и сбросовой кинематики. В его составе преобладают песчаники с прослоями конгломератов, встречаются алевролиты и аргиллиты с маломощными линзовидными прослоями углефицированных растительных остатков. Состав песчаников кварц-полевошпатовый с редкими прослоями вулканокластических песчаников. Породы палеозоя-мезозоя полностью перекрыты неравномерным чехлом четвертичных отложений.

В геологическом строении полуострова *Нордвик* присутствуют осадочные породы широкого возрастного диапазона, но на дневную поверхность выходят только отложения девона, триаса, юры и мела. Нижний девон представлен мощной пачкой каменной соли и гипсом с включением доломитов. Каменная соль слагает ядра соляных куполов. Триас развит фрагментарно и представлен песчаником, конгломератом и алевролитом. Породы юрского периода занимают значительную по площади территорию полуострова – всю его северную часть. Спектр пород крайне широк: пески алевритистые, алевриты, песчаники, пелиты и известняки. Активные клифы побережья сложены именно породами юрского периода. Меловые отложения также представлены терригенными породами: алевритами, песками и пелитами. Как и на Восточном Таймыре вышеописанные осадочные породы перекрыты чехлом четвертичных отложений, которые получили наибольшее распространение в кутовых частях залива у мыса Харга и мыса Нордвик (бухта Отмелая).

Стратиграфия четвертичных отложений в пределах Таймыро-Североземельский и Сибирский морфолито-генетических зон определена по совокупности факторов: литологическое строение отдельных толщ, их геоморфологическое положение, данные палеонтологии, характер спорово-пыльцевых комплексов, а также абсолютные датировки радиоуглеродным методом. Четвертичные отложения распространены практически по всей рассматриваемой площади, покрывают неравномерным плащом всю приморскую часть, приуроченную к Северо-Сибирской низменности, представлены средним и верхним звеном неоплейстоцена, а также голоценовыми отложениями.

Голоценовые морские отложения (mQ_{IV}) на территории суши формируют незначительные по ширине пляжи, косы, приустьевые участки речных долин, открывающихся к морю, и представлены галечниками, песками с прослоями галечников, алевритов, растительного детрита и раковинами морских моллюсков. Среди донных отложений мелководного шельфа выделяются волновые прибрежные, бассейновые и потоковые образования. Волновые отложения доминируют на акватории моря Лаптевых (мощность 5-10 м) и представлены песками, алевритами с растительным детритом и раковинами морских моллюсков. Бассейновые отложения (мощность – первые метры) формируются в бухтах Хатангского залива, Марии Прончищевой и Анабарской губе, представлены илами, алевритами, супесями с прослоями песка, гравия, растительного детрита, обломками древесины. Потоковые

(подводнофлювиальные) отложения мощностью до 5 м характерны только для Хатангского залива и Анабарской губы, сложены песками и галечниками.

Глава 3. Инженерно-геологическое строение регионов исследований

В главе 3 рассмотрены основные аспекты инженерно-геологического строения рассматриваемых морей. В каждом регионе исследований было выбрано от двух до трех районов, которые существенно отличаются друг от друга как по характеру формирования физико-химических свойств морских органо-минеральных грунтов, так и по седиментационным и постседиментационным процессам, проходящим в грунтовой толще.

Северо-охотоморский шельф и шельф заливов Терпения и Анива отличаются между собой геоморфологическим положением в общем структурном плане Охотского моря. Если Северо-охотоморский шельф представляет протяженную, открытую в сторону моря, затопленную в четвертичное время прибрежную часть суши с глубинами до 140 м, то заливы Анива и Терпения – полузамкнутые заливы (халистазы) с глубинами 50-80 м.

В Кандалакшском заливе Белого моря выбор трех ключевых районов обусловлен исключительной важностью тех геологических процессов и явлений, которые определили в конечном итоге современный облик морских органо-минеральных грунтов. На приливной равнине о. Большой Горелый по результатам исследований был выделен новый вид органо-минерального грунта – морской фитолит. На ватте о. Средний рассмотрены вопросы эволюции физико-механических свойств органо-минеральных грунтов вышедших вследствие неотектонического поднятия на дневную поверхность. В бухте Никольская рассмотрен вопрос стадийности формирования глинистых грунтов в присутствии органического вещества. Помимо общих черт геологического строения, стратиграфии четвертичных отложений и общего неотектонического поднятия Карельского берега Белого моря рассматриваемы участки принципиально отличаются по характеру и направленности современных экзогенных процессов, протекающих в их пределах, которые в свою очередь обусловили специфику состава, строения и свойств рассматриваемых органо-минеральных грунтов. Поэтому подробное геологическое, геоморфологическое и инженерно-геологическое описание каждого из рассматриваемых участков принципиально важно (несмотря на некоторое повторение общих черт строения), т.к. именно оно определяет системный взгляд на современные морские илы.

В море Лаптевых бухта Моржовая восточно-таймырского шельфа и бухта Отмелая залива Нордвик при общем внешнем сходстве выделяемых в них геоморфологических элементов отличаются по геологическому строению побережья.

Охотское море. Геологическое строение верхней части разреза дна заливов Анива, Терпения и Северо-охотоморского шельфа изучено на основании данных инженерно-геологического бурения, пробоотбора легкими техническими средствами (ЛТС) и анализа материалов непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП). В силу того, что по заливам Анива, Терпения и Северо-охотоморскому шельфу были составлены только карты донных осадков, а детальные геологические и инженерно-геологические исследования не проводились, то объем инженерно-геологической съемки расширился, и включил в себя составление геологической (стратиграфической) основы, на базе которой впоследствии производились последующие собственно инженерно-геологические построения. Основной таксонометрической единицей стал стратиграфо-генетический комплекс, включающий в себя разновозрастные отложения одного вещественного состава. В пределах стратиграфо-генетического комплекса на основании инженерно-геологической номенклатуры выделялись инженерно-геологические элементы.

Данные о геолого-геоморфологическом строении окраины континента позволяют высказать однозначное утверждение, что формирование материкового шельфа Охотского моря происходило в процессе общего тектонического погружения окраины материка в четвертичное время и периодических гляциоколебаний уровня океана. Абразионно-аккумулятивное выравнивание погружающейся суши и выработка субгоризонтальной равнины шельфа осуществлялись, благодаря неоднократным миграциям волноприбойной

зоны в фазы регрессий и трансгрессий моря. Уровень моря в эпоху последнего оледенения наиболее вероятен 120-130 м ниже современного, на что указывают погребенные речные долины однозначно аллювиального происхождения. Таким образом, отложения всех изученных регионов рассматриваются нами как субаквальные, и предпринятая сеймостратификация заключалась в возрастной привязке, определении типов пород и уточнении фациальной принадлежности выделенных сейсмоакустических комплексов. Как правило, сейсмоакустический комплекс соответствовал стратиграфо-генетическому, что значительно облегчило расшифровку геологического строения территорий.

Северо-охотоморский шельф имеет ширину около 300 км, при глубине внешнего края порядка 170-350 м, и относится к аккумулятивному типу экзогенной группы. Он характеризуется выровненной поверхностью с аккумулятивным профилем равновесия со средними уклонами базисной поверхности 5'-8'.

Плиоцен-плейстоценовый структурно-стратиграфический комплекс распространен повсеместно в рассматриваемом регионе. Материалы НСАП позволили расчленить эти образования на генетически однородные осадочные тела – сейсмоакустические комплексы (САК), разделенные между собой отчетливыми и выдержанными границами. Возрастная индикация отложений обосновывалась структурным взаимоотношением отдельных элементов, рисунком записи и сопоставлением с результатами бурения на сопредельной суше. По данным НСАП выделено шесть субгоризонтальных, параллельно залегающих САК. САК-6 залегает с угловым и стратиграфическим несогласием на дислоцированных породах отнесенных к верхнему неогену. Мощность всех шести комплексов колеблется в весьма широких пределах: от первых метров у побережья до 160 м в межструктурных седловинах. На куполах антиклинальных структур порядка 25 м. САК-I – распространен повсеместно и сплошным чехлом покрывает отложения верхнего плейстоцена (mQ_{III}). Исходя из истории геологического развития Охотского моря эти отложения отнесены к одному стратиграфо-генетическому комплексу – голоцен-современным морским отложениям (mQ_{IV}). В инженерно-геологическом плане выделяются пять инженерно-геологических элементов: ил глинистый, ил суглинистый, ил супесчаный, галечниковый грунт с глинистым заполнителем и песок гравелистый.

Доминирующее положение на Северо-охотоморском шельфе занимает ил глинистый. Им сложено до 95 % территории. Ил суглинистый и ил супесчаный занимают подчиненное положение. Все три вида грунта, как правило, фациально-литологически замещают друг друга как в плане, так и по разрезу без видимых закономерностей. Обломочные грунты имеют резко подчиненное значение и образуют тонкие слои малой мощности (5-10 см) и протяженности. Весь псефитовый и псаммитовый материал (галька, гравий, песок различной крупности) привнесен в осадок ледовым разносом.

В исследованном регионе имеется четкая смена песчаных и песчано-глинистых отложений глинистыми. До глубины 70 м инженерно-геологический разрез представлен песком мелким, суглинком текучим с гравием и галькой ниже собственно илом глинистым. Отметка 70 м принята нами за глубину иловой линии для Северо-охотоморского шельфа.

Шельф залива Терпения находится на востоке о. Сахалин между горными сооружениями Тонино-Аниивского полуострова и Западно-Сахалинскими горами, и приурочен к тыловой части Поронайского тектонического прогиба. В геоморфологическом плане это абразионно-аккумулятивная равнина, которая с глубины порядка 50-60 м сменяется выровненной аккумулятивной равниной с углами падения 2'-8'. По данным НСАП осадочный покров аккумулятивной равнины повсеместно подразделяется на шесть горизонтально залегающих сеймокомплексов четвертичного возраста, залегающих на сильно эродированной поверхности неогеновых пород. Комплексы залегают горизонтально и уверенно прослеживаются по профилям-связкам с уменьшением мощности до полного выклинивания (кроме САК-I) до берега. Суммарная мощность всех шести САК в центре залива максимальна и достигает 90 м. Структурная запись отражающих поверхностей внутри пачек существенно отличается друг от друга. То же самое отмечается на выдержанности и

коррелируемости опорных отражающих границ, где на коррелятивных эпохах регрессивных условий фиксируется максимальное количество эрозионных врезов. Все эти признаки заставляют предположить о закономерной цикличности в образовании осадочного разреза. САК-I (голоцен-современный – mQ_{IV}) в инженерно-геологическом разрезе дна залива представлен илом глинистым, залегающим практически по всей территории шельфа за исключением прибрежной части до изобаты 15-20 м, и района примыкающего к устью р. Поронай, которые сложены несвязными грунтами от валунного до песка различной крупности. Мощность комплекса илов весьма значительна от 4,8 до 6,1 м.

Шельф залива Анива расположен на юге о. Сахалин и также приурочен к краевой части тектонической депрессии (Сусунайский прогиб), между полуостровами Тонино-Анивский и Крильон. Рельеф дна представляет поверхность ровной аккумулятивной равнины с незначительным ($3'$) уклоном к центру залива. Осадочный покров подразделяется с поверхности дна моря на 6 САК, суммарной мощностью до 100 м. Возрастная индикация тождественна разрезу залива Терпения ($Q_{II}-Q_{IV}$). САК-I представлен одним стратиграфо-генетическим комплексом и одним инженерно-геологическим элементом – илом глинистым. Мощность илов в заливе Анива самая значительная из всех трех регионов и достигает 10-12 м в центре залива. В основании комплекса илов залегает базальный горизонт, представленный хорошо мелкой окатанной галькой и гравием. Ниже супесь серая текучая (ИГЭ-2), которая подстилает вышележащие грунты, начиная разрез верхнечетвертичных пород САК-II – (mQ_{III}^4).

Отличительной чертой геологического строения обоих заливов является широкое развитие палеодолин и палеоврезов верхнеплейстоценового возраста. Характерный разрез долины вскрыт на Найбинской площади залива Терпения. Сверху долина, имеющая V-образный профиль, перекрыта мощным горизонтом морских голоценовых илов. Под ним залегает глина серая текучая с мелкими прослоями глины текучепластичной, а ниже ил глинистый черного цвета с редкими обломками раковин. Мощность глинистых грунтов до 4 м. Нижняя часть разреза выполнена текучей темно-серой супесью (12 м). Долина врезана в горизонт суглинка серого мягкопластичного с линзами глины мягкопластичной и примесью детрита ракуши до 5%. Общая мощность аллювиальных отложений в палеодолине – 16 м.

Белое море. Керетский архипелаг Кандалакшского залива Белого моря – располагается в пределах шхерного побережья губ Чупа и Кереть. Главная особенность рассматриваемой территории – наличие приливно-отливных течений, которые определяют всю специфику формирования свойств органико-минеральных грунтов. Высота сизигийных приливов в рассматриваемом районе составляет до 1,6 м. Ширина приливной полосы в зависимости от типа береговой линии и общего уклона литорали может достигать десятков метров.

По данным многочисленных проведенных исследований поверхностные осадки Кандалакшского залива в целом представляют гетерогенные по возрасту и генезису образования, отличительными особенностями которых являются, во-первых, пестрота и мозаичность распределения на дне, во-вторых, преимущественно обломочный состав. Вдоль берега, в зоне волнового поля, распространены мелко-тонкозернистые хорошо сортированные пески с повышенным содержанием тяжелых минералов. Мористее они замещаются плохо сортированными гравийно-алевро-песчаными отложениями, развитыми в основном до глубины 50-70 метров вплоть до бровки региональных террас. Наиболее глубокие части акватории выполнены алевро-глинистыми осадками, почти всегда содержащими небольшую примесь песка и зерен гравия.

Поскольку исследуемая территория испытывает преимущественно неотектоническое поднятие, составляющее в Кандалакшском заливе 2-4 мм в год, размыв клифов и прибрежных моренных накоплений ведет к усиленной аккумуляции мелкозернистого материала на литорали и пляжах, образованию осушенных, заполненных голоценовыми и современными осадками бухт и проливов.

Ключевыми для рассмотрения условий формирования морских органо-минеральных грунтов на данной территории являются два участка с интенсивным современным седиментогенезом:

1. Приливная равнина о. Большой Горелый, где происходит образование лагунных органо-минеральных и органогенных грунтов, с глубиной до 1 м по воде.

2. Органо-минеральные отложения бухты Никольская, где отмечается образование сравнительно глубоководных (до 20 м) глинистых илов.

Исследования проводились на *приливной равнине*, обрамленной останцами первой морской террасы, которая переходит в марш, ватт и пляж. Для инженерно-геологической характеристики территории наиболее важным является микрорайонирование приливной зоны с выделением ряда участков, в пределах которых формируются грунты определенного типа и свойств, характеризующиеся однородностью литолого-генетических и геоморфологических показателей. Также учитывались факторы осадконакопления в определенной фациальной обстановке, постгенетические преобразования осадка в грунт, направленность современного экзогеодинамического процесса, тектоническая обстановка, состав грунтов слагающих верхние горизонты.

Ваттовые осадки накапливаются под влиянием приливо-отливных течений в полосе между низким уровнем моря, границей сизигийного отлива, и границей максимального сизигийного прилива. Вся эта полоса носит название осушки, которая делится линией низкого квадратурного прилива на две части: выше нее преобладают субаэральные условия, ниже – земноводные. С линией сизигийного прилива совпадает нижняя граница марша – части приливно-отливных течений. В тыловой части марш ограничен низкой террасой – польдером, сложенной, как и марш, более древними ваттовыми отложениями.

Вся рассматриваемая территория представляет собой береговую зону, отделенную от материковой части морской террасой, переходящей в береговые валы, пляж и приливные равнины, ограниченные с моря подводным склоном – бенчем, которые обычно имеют два уступа: на уровне малой воды сизигийного отлива и на уровне полной воды квадратурного прилива, поэтому такие приливные равнины называют ступенчатыми.

Проведенное микрорайонирование территории позволило выделить основные геолого-геоморфологические элементы: первая морская терраса, марш, пляж, регулярная осушка, литоральные лагуна каналы стока и литоральная лагунная ванна. Для наших исследований важнейшими геоморфологическими элементами приливной равнины явилось изучение современного осадконакопления в литоральных лагунных ваннах литоральных лагун.

Литоральные лагуны – обводненные застойные мелководья изометричной формы, размер их составляет до 250 м², а глубина 0.3-0.4 м. Между собой и с морем литоральные лагуны соединяются каналами стока. Дно их с поверхности сложено рыжевато-серым или зеленовато-глинистым и песчанистым илом с многочисленными пятнами ожелезнения. Под наилком залегают либо гравелистый разнозернистый песок темно-серый, сверху гумусированный с мелким щебнем либо темно-серая супесь с гравием, либо темно-серый суглинок со щебнем. В зависимости от доминирующих на данной территории геологических процессов (прежде всего направленности неотектонических движений) литоральная лагуна превращается либо в ложбину насыщения, либо при погружении в истинную лагуну с приливно-отливным режимом осадконакопления.

Литоральная лагунная ванна - была выделена в пределах литоральной лагуны как самостоятельный геолого-геоморфологический элемент. Они располагаются, как правило, либо в кутовой части приливной равнины (в нашем случае литоральной лагуны), либо на отдельных положительных формах рельефа – возвышениях. Заполняются водой исключительно только во время полного сизигийного прилива. В геоморфологическом отношении они представляют собой постоянно обводненные очень мелководные (глубиной 0,2-0,4 м) водоемы различных форм и размеров (максимально выявленный размер 3 x 8 м), отшнурованные от моря узкими перешейками – барами, пронизанным сетью коротких

каналов стока. Именно в литоральных лагунных ваннах происходит интенсивное образование глинистых и органо-минеральных грунтов (рис. 1).

По берегу лагуны, выходящей на марш, на траве, отмечается большое количество штормовых выбросов (*Cladophora sp.*, *Fucus vesiculosus*). Также сплошным покровом современные водоросли покрывают все дно литеральной ванны. Вода у кромки берега имеет коричневато-бурый оттенок с синеватой металлической железистой пленкой, что является явным признаком окислительных процессов. Поверхность дна бугристая с резкими и невысокими поднятиями (до 5-10 см). Кроме этого повсеместно по всей поверхности литеральной ванны (особенно в местах примыкания к отдельным валунам) отмечаются пятна и выцветы розового, малинового и охристо-коричневого цвета. В тех местах дна, где слой современных водорослевых матов достаточно велик (до 2-4 см), отмечаются отдельные вздутия (пузыри), при разрушении дающие резкий запах сероводорода.

В сизигийный отлив в летнее время вода в литоральной лагунной ванне из-за незначительной глубины последней (до 7-10 см) хорошо прогревается (температура воды колеблется в пределах +25+27°C), что создает благоприятные условия развитию биохимических процессов как в барьерной зоне «вода-осадок», так и собственно в верхней части грунтовой толщи.



Рис. 1. Литоральная лагуна

Бурые, малиновые, ярко-розовые выцветы при сизигийном отливе остаются в пределах литоральной лагунной ванны, концентрируясь в локальных понижениях рельефа. Первые мм разреза представляют собой тонкое (до 0,1-0,2 мм) отчетливое переслаивание (до 5-10 слоев) полурасложившихся «биогеогенных матов», по всей вероятности имеющее сезонный возраст.

После изоляции нитевидного суспензионного наплавления от богатого кислородом слоя придонной морской воды аэробные условия сменяются на анаэробные. Цвет осадка с охристого сменяется на иссиня-черный. Резко восстановительные условия формирования осадка выражаются в интенсивном образовании H_2S . В зависимости от количества разлагаемого органического вещества в осадке в отдельных местах содержание H_2S может быть весьма значительным, поэтому по всему дну водоема наблюдаются локальные (1-2 см в диаметре и 0,5-1,0 см по высоте) сероводородные вздутия (пузыри).

0,0 – 0,1 см – Пленка бурая, коричневато-бурая и коричневато-охристая, гелеобразная (студнеобразная), тонковолокнистая, с отдельными нитевидными волокнами. При падении уровня воды во время сизигийного отлива вся органическая масса ложится на дно седиментационной ванны и частично обсыхает. 0,1 – 1,0 см – Слои водорослевых матов

(каждый слой около 1 мм) черные, водонасыщенные. В нижней части интервала степень разложения увеличивается. Резкий запах H_2S . Граница с вышележащим слоем четкая. 1,0 – 1,5 (2,5) см – Торф черный с остатками растительных тканей, глинистый, водонасыщенный (морские нитчатые водоросли – *Cladophora sp.*). В верхнем интервале еще сохраняется горизонтальная или субгоризонтальная структура, параллельная поверхности морского дна. Граница с вышележащим слоем нечеткая, переход постепенный. 1,5 (2,5) – 3,0 (5,0) см – Постепенный переход полностью разложившихся черных текучих остатков морских водорослей (в низах параллельная структура полностью отсутствует) в ил органогенный, черный, глинистый, текучий, водонасыщенный с резким запахом H_2S . В самом конце интервала иссиня-черный цвет осадка постепенно сереет. 3,0 (5,0) – 10,0 см – Ил глинистый серовато-зеленый, серый и оливково-болотный, текучий, водонасыщенный с большим количеством полностью разложившихся водорослей и разноориентированных остатков корней прибрежных растений. 10,0 – 35,0 см – Постепенный переход от ила серовато-зеленого к глине серой, белесо-серой, текучей и текучепластичной. В низах интервала отмечается появление плохоокатанной мелкой гальки и мелкого щебня с одновременным резким уменьшением количества растительных тканей. 35,0 – 50,0 см – Постепенный переход от глины серой текучей к суглинку серому мягкопластичному. Единичная галька и створки моллюсков. 50,0 – 70,0 см и ниже – супесь серая, пластичная, плотная, маловлажная с пятнами рыжеватого ожелезнения, с редкими скоплениями опесчаненных линз (1,0-3,0 см), с мелким хорошо окатанным гравием и единичными створками двустворчатых моллюсков.

Максимальные значения естественной влажности зафиксированы у водорослевого мата (бурой пленки) – до 1200%. Черный органический и серый органо-минеральный грунты (ил глинистый серый) характеризуются повышенными значениями естественной влажности: $W_e=400-500\%$ и 110-150% (в среднем 135%) при влажности верхнего предела пластичности (W_L) до 185% и 160% и низкими значениями плотности и плотности твердых частиц грунта: $\rho=1,02-1,09$ (средняя – 1,04 г/см³), $\rho_s=2,13$ г/см³ и 1,04-1,08 (средняя 1,06 г/см³) и 2,59 г/см³ соответственно. У глины серой текучей и суглинка серого текучего значения W_e и W_L резко падают и составляют $W_e=39-44\%$ (среднее – 40%) и 33-39% (среднее – 36%), $W_L=43\%$ и 47%. Значения плотностей наоборот возрастают до $\rho=1,69$ г/см³, $\rho_s=2,52$ г/см³, 1,87 г/см³ и 2,65 г/см³. Содержание органического вещества лавинообразно уменьшается с 60% в придонном слое осадков до 4,8 % в суглинках и 3,9% в супесях. Это скачкообразное уменьшение происходит всего на 70 см литологического разреза.

В качестве еще одного критерия для анализа изменения свойств грунтов был добавлен показатель содержания суммарного белка (**СБ**) – интегральная характеристика, включающая все формы белковых соединений микроорганизмов (живых и мертвых клеток), белковые продукты их метаболизма и белок, входящий в состав захороненных растительных остатков. В черном органо-минеральном грунте (с 0,1 до 4 см) W_e уменьшается с 936 до 360% ($\Sigma = 360\%$), в сером органо-минеральном грунте около 300%. $C_{орг}$ ведет себя синхронно и, соответственно, уменьшается с 60,1 до 53,3% ($\Sigma = 52,2\%$) и с 53,3 до 23,3% ($\Sigma = 41\%$). **СБ** ведет себя непостоянно, варьирует в диапазоне от 573,2 до 117,4 мг/г ($\Sigma = 350$ мг/г) у черного органо-минерального грунта и от 75,8 до 246,2 мг/г ($\Sigma = 174,5$ мг/г) у серого органо-минерального. В текучих грунтах (глинах, суглинках и супесях), залегающих ниже органо-минеральных грунтов, показатели W_e , $C_{орг}$ и **СБ** стабильны. Если рассматривать эту толщу в целом, то значения W_e менее 48%, $C_{орг}$ в среднем 5%, **СБ** в среднем 170 мг/г. Максимальные значения биохимических показателей приурочены к верхнему литологическому горизонту и к границам литологических разностей на границе черного и серого органо-минеральных грунтов: 1 горизонт $C_{орг} = 60\%$, 2 горизонт $C_{орг} = 54\%$, **СБ** – 392,7 мкг/г. На границе серого органо-минеральных грунта и глины $C_{орг} = 7\%$, **СБ** – 246 мкг/г.

Таким образом, можно выделить три геохимических и биохимических обстановки: одну окислительную и две восстановительных. Окислительная обстановка (до глубины 0.1 см) представлена водорослевыми матами и бурой пленкой. Граница с бурой пленкой является

границей изоляции осадка от придонной, насыщенной кислородом морской воды, а также, собственно, границей интенсивного осаждения неводных частиц и характеризуется аномально высокими значениями естественной влажности (до 1200%) и *СБ* до 950 мкг/г. В этой обстановке наблюдается начало коагуляции твердых и органических частиц в присутствии растворенного органического вещества, которое и является главным фактором коагуляции. Рассматриваемая геохимическая обстановка характеризуется наличием химических элементов высшей степени окисления. Отмечается резкое уменьшение содержания Mn и Fe вниз по разрезу при достаточно стабильном содержании Al_2O_3 , MgO, CaO, K_2O , Na_2O .

Первая восстановительная обстановка начинается с глубины 0.1 см и прослеживается до глубины 4...10 см. В грунтах, залегающих в этом интервале, начинается гравитационное уплотнение осадка: отжатие поровой воды; доминирует развитие анаэробных процессов, сопровождающихся переходом окисных соединений в закисные и сменой аэробной микрофлоры на анаэробную, что подтверждается высокими значениями биохимических показателей.

Обе выделенные зоны весьма подвижны как по величине осадка, так и по распространенности на морском дне. Наверное, в этом случае можно говорить о грунтах как об образованиях, находящихся в стадии земноводного седиментогенеза.

Вторая восстановительная обстановка начинается примерно с глубины 10 см. Осадочный разрез представлен нормально уплотненными грунтами, прошедшими раннюю стадию диагенеза, о чем свидетельствуют достаточно низкие значения показателей как W_e (менее 48%), так и $C_{орг}$ (5%), менее которые вниз по разрезу не претерпевают существенных изменений. Здесь анаэробные процессы развиты наиболее широко – pH = 5.50-6.55 и роль анаэробной микрофлоры является главенствующей.

На аккумулятивных континентальных шельфах различного типа смена окислительной геохимической обстановки на восстановительную имеет исключительно физико-химическую природу. В рассматриваемой прибрежно-морской седиментационной обстановке данный процесс имеет, вероятно, существенно более биохимический характер, именно содержание биоты является катализатором геохимических процессов и изменения валентности катионов. Следовательно, в литоральной лагунной ванне влияние органического вещества является определяющим для процесса формирования физико-химических свойств грунтов на начальных стадиях осадконакопления.

Исходя из общей инженерно-геологической классификации грунтов в данном случае по всей совокупности факторов (главным из которых является наличие в составе грунта 50% и более органического вещества) мы, по всей видимости, можем выделить новый вид органического грунта – *морской фитолит* (табл. 1).

Основные природные факторы, контролирующие образование и последующую геологическую эволюцию морских фитолитов на приливных равнинах Белого моря: 1) Геоморфологическое строение вдольбереговой линии (образование происходит только в литеральных лагунах приливных аккумулятивных равнин); 2) Степень биологической продуктивности прибрежных вод (количество выброшенных на берег в период штормов и приливо-отливных явлений водорослей); 3) Гидрологическая обстановка прилегающей акватории (постоянная вдольбереговая циркуляция вод); 4) Приливо-отливные и сгонно-нагонные явления; 5) Общее количество, направленность и сила осенних штормов; 6) Мощность ледового покрова и дрейфовые процессы (чем суровее зима, тем более длительный период существования ледового покрова, якорение последнего на уровне береговой линии и вынос льда с вмержшим в него верхним горизонтом грунта, накопленного в летний период); 7) Сезонные климатические температурные изменения погоды (продолжительность и степень летнего прогрева атмосферы: чем выше температура, тем больше прогрев ванн, и тем больше степень разложения органического вещества).

Год	Мощность, см	W _с , %	W _L , %	W _р , %	I _р	I _L	n, %	e	ρ, г/см ³	ρ _s , г/см ³	C _{орг} , %
1997	2,9	464	186	159	27	11,30	91	10,49	1,04	2,12	54
1998	2,9	414	190	161	29	8,72	91	9,74	1,01	2,11	55
1999	3,0	398	189	164	25	9,36	90	8,68	1,02	1,98	59
2001	3,0	423	179	153	26	10,38	90	9,46	1,01	2,02	55
2002	3,1	455	169	141	10	11,21	91	10,59	1,02	2,13	63
2003	3,1	489	198	168	30	10,70	91	10,61	1,01	1,99	66
2004	3,2	411	157	130	27	10,41	90	9,47	1,02	2,09	61
2007	3,3	459	189	165	24	12,25	91	10,35	1,02	2,07	67
2010	3,4	437	174	151	23	12,43	91	9,91	1,03	2,09	61
2011	3,5	447	169	144	25	12,12	91	10,09	1,04	2,11	52

Таблица 1. Физико-химические свойства морских фитолитов

Нам представляется два пути дальнейшей эволюции данного вида органического дисперсного связного грунта:

1. При неблагоприятных условиях (в подавляющем большинстве случаев) он полностью разрушается вследствие либо штормовых размывов, либо ледовой абразии.

2. При благоприятных условиях с учетом общего тектонического поднятия всей территории (до 5 мм в год) грунт превращается в маршевую гидроморфную почву. По нашим данным общий тренд в осадконакоплении исследованной латеральной лагунной ванны заключается в постепенном увеличении мощности фитолита (до 5 мм) за весь период наблюдений.

Принципиально другой характер седиментации характерен для полузакрытых бухтах Кандалакшского залива Белого моря, где происходит современное интенсивное образование морских органо-минеральных грунтов – илов. Голоценовые глинистые осадки бухты Никольская образовывались непрерывно в течение последних 500-1000 лет при постоянном и стабильном поступлении терригенного материала с сопредельной суши. Существенным моментом является то, что область рассматриваемой современной седиментации находится на небольших глубинах (15-30 м) вне зоны волнового воздействия. Количество станций донного пробоотбора и значительный временной период наблюдений (1997-2011 гг.) по одним и тем же точкам был достаточным для получения уверенного и достоверно повторяемого ряда физико-химических характеристик илов. Общее литологическое строение верхней части разреза выглядит следующим образом: +3,0 – 0,0 см – «Наилок» рыжевато-бурый (органо-минеральная взвесь). 0,0 – 5,0 (7,0) мм – Осадок бурый, рыжевато-бурый, текучий, гелеобразный, водонасыщенный. Многочисленные створки раковин моллюсков *Mytilus edulis L.* (целые и фрагментированные) различной величины. Ниже грунт имеет физические характеристики, которые позволяют рассматривать его как связное тело – «грунтовая среда (грунтовое поле)». 5,0 (7,0) мм – 17 (20,0) мм – ил глинистый черный, текучий, бесструктурный. Граница с выше и нижележащими слоями четкая. 17 (20,0) мм – 8 (11) см – ил глинистый черный, текучий, со временем оплывающий. 8 (11) – 32,0 см – ил глинистый зеленовато-серый с примазками ила глинистого черного (гидротроиллит), текучий, держит форму. 32,0 – 50,0 см ↓ – ил глинистый зеленовато-серый с единичными примазками черного цвета, текучий. Во всем вскрытом интервале отмечается присутствие раковин мидий различной степени сохранности, количество которых и степень разложения уменьшаются вниз по разрезу до 1-3%.

Таблица 2

Сводная таблица показателей гранулометрического состава и физико-химических свойств илов

Глубина отбора, см.	We, %	W _L , %	W _p , %	W _r , %	I _p	I _L	P _s , ³ г/см ³	P, г/см ³	n, %	e	Сорг, %	Гранулометрический состав, в % к весу						
												1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
0-0,3	195	119	79	2,0	40	5,44	2,57	1,18	88	7,61	7,7	3,4	4,7	5,2	53,4	22,5	9,0	1,8
0,3-0,5	187	112	81	1,9	31	4,99	2,59	1,22	86	6,122	7,6	0,1	3,1	8,4	53,5	22,7	10,0	2,1
5,0	182	111	80	1,7	31	4,72	2,61	1,23	85	5,647	6,8	0,1	5,9	8,3	52,5	22,4	9,0	1,8
10,0	179	103	69	1,9	34	4,33	2,62	1,24	85	5,484	6,8	0,1	6,0	8,2	50,1	23,4	10,1	2,1
15,0	167	104	66	2,0	35	3,98	2,62	1,25	84	5,191	5,9	1,0	3,1	8,1	48,0	27,2	9,1	3,5
20,0	161	121	86	1,8	35	2,17	2,64	1,31	81	4,26	4,8	1,2	3,5	7,9	50,6	23,9	10,4	2,5
25,0	157	118	83	1,9	35	2,13	2,65	1,32	81	4,168	5,0	-	3,0	10,0	52,9	23,5	8,9	1,7
30,0	146	117	82	1,9	35	1,83	2,66	1,34	79	3,873	3,9	0,1	4,0	9,8	52,1	23,5	8,7	1,8
35,0	149	127	89	1,5	38	1,58	2,67	1,34	80	3,973	3,0	-	3,7	9,5	52,1	22,4	10,0	2,3
40,0	140	121	91	1,6	30	1,65	2,68	1,35	79	3,764	2,9	0,5	5,2	9,1	50,7	23,2	9,3	2,0

Показатели значений физико-химических свойств илов по глубине инженерно-геологического разреза отличаются год от года, но тем не менее, общие тенденции в изменении свойств прослеживаются весьма отчетливо (таб. 3). В целом при поинтервальном анализе разреза донных осадков сверху вниз наблюдается классическая картина уменьшения значений физико-химических показателей (W_e с 195% до 140%, I_l с 5,44 до 1,65), что связано с уменьшением количества свободной воды в грунтовой системе. Значения физических характеристик осадка, таких как плотность ρ , наоборот, закономерно увеличивается (с 1,18 до 1,35 г/см³), что объясняется уменьшением порового пространства (пористость n уменьшается с 88 до 79%) и уплотнением осадка вышележащими горизонтами илов вследствие непрерывного процесса седиментации. В исследованной секвенции илов содержание $S_{ор}$ вниз по разрезу уменьшается с 7,7% (интервал 0,0...0,3 см) до 2,9% (глубина 40 см), что является существенным даже для полярного литогенеза.

Кроме растворенного органического вещества, большое влияние на свойства грунтов Белого моря оказывает современная макрофауна, которая либо селится на грунтовой субстрате, либо использует последний как свою постоянную среду обитания.

Двустворчатый моллюск *Mytilus edulis* L. (мидия) в естественной среде обитания образуют на мелководье обширные поселения-колонии – мидиевые банки. Являясь активным биофильтратором мидии существенно преобразуют глинистый грунт (до 15-20 см), обогащая его органическим веществом (до 25%).

Многочетинковый червь рода *Polychaeta Arenicola marina* L. (пескожил) при питании в процессе своей жизнедеятельности проглатывает значительное количество грунта на приливной равнине, тем самым существенно преобразует первоначальные физико-химические свойства субстрата, вплоть до преобразования минерального состава грунтов: улучшение окристаллизованности иллита; увеличение содержания Fe-хлорита; уменьшение содержания смектита и тенденции к образованию гипса $CaSO_4 \times 2H_2O$.

Море Лаптевых. Формирование состава и свойств морских органо-минеральных грунтов прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых исследовалось на двух участках: бухта Моржовая (б. Цветкова) восточного побережья п-ова Таймыр и бухта Отмелая залива Нордвик в междуречье рек Хатанга и Анабара.

Бухта Моржовая (б. Цветкова) находится на восточном побережье п-ова Таймыр между мысом Сибирским и мысом Прончищева. Бухта представляет собой вытянутый в субширотном направлении полузамкнутый водоём, отделённый от моря Лаптевых пологой узкой галечниковой косой длиной 5,1 км. Максимальная глубина в центре бухты достигает 3,0 м. Бухта имеет очень сложное геоморфологическое строение, отражающее историю геологического развития данной территории в голоцене. В ее строении можно выделить два участка: «зона продольных кос» (I) и «зона открытой воды» (II).

«Зона продольных кос» – система полузамкнутых сообщающихся между собой водоемов, разделенных направленными друг к другу косами второго порядка (азимуты северо-запад и юго-запад). Из-за общего уклона всей территории в юго-восточном направлении эти преимущественно песчано-галечные образования полностью обсыхают во время сизигийного отлива, при этом чем мористее расположена коса, тем менее она подвержена осушке. В зоне кос можно выделить три сегмента: Ia – марш – зона бухты, полностью вышедшая на дневную поверхность и не затапливаемая водой даже в сизигийный прилив; Ib – регулярная осушка – зона сизигийного прилива, район кутовой части лагуны, затапливаемая водой в сизигийный прилив, преимущественно транзит осадочного материала; Ic – зона кос, постоянно находящаяся под водой, преимущественно седиментация осадка.

Бухта Отмелая является частью залива Нордвик и находится непосредственно к западу от полуострова Урюнг-Тумус. Берега бухты низкие, особенно в ее вершине, и большей частью заболоченные. На западном берегу имеются короткие активные клифы. Глубины на входе в бухту 6-8 м, а в средней ее части 5-6 м. В кутовой части бухты располагается осушающая отмель (шириной до 1,5 км), сложенная песчано-алевритовыми и песчаными грунтами.

В геоморфологическом отношении бухта Моржовая представляет собой полого-наклоненную в юго-восточном направлении приливную равнину, практически полностью затапливаемую в сизигийный прилив (максимальная высота приливов до 0,8 м). Берег в кутовой части заболоченный. Дно самой бухты выполнено преимущественно глинистыми осадками глубиной до 0,3-1,1 м.

Бухта Отмеляя, являющаяся частью залива Нордвик, находится непосредственно к западу от мыса Нордвик и отделена с юга и запада от остального залива одноименной косой. В вершине бухты располагается очень пологая осыхающая отмель (приливная равнина) шириной до 1,5 км, сложенная песчано-алевритовыми и песчаными грунтами. Уровень осушки меняется в зависимости от фаз луны, с максимальными величинами до 0,8 м. Именно в кутовой части бухты отмечается максимальная мощность современных донных осадков. Район исследований расположен в области распространения многолетнемерзлых пород с мощностью деятельного слоя на суше от 0,35-0,5 м (глины) и 1,5 м (пески), а на акватории – до 1,5 м и более. Породы, залегающие под водами бухт, талые (охлажденные) на поверхности с глубиной переходят в пластичномерзлое состояние.

Все изученные отложения верхней части разреза барьерной зоны «берег-море» относятся к аккумулятивной форме рельефа – аллювиально-морской равнине (Q_{IV}), выполненной песчано-глинистыми грунтами. Отложения, слагающие приурезную зону моря, разнообразны как в петрографическом, так и в гранулометрическом отношении и представляют весь спектр природных дисперсных связных и несвязных грунтов. В узких зонах абразии коренных клифов развит разной степени окатанности глыбовый и валунный материал. Для волноприбойной зоны пляжа характерны более мелкие: галечники и гравийники, переходящие в пески гравелистые до крупных и средней крупности. В зонах вне поля активного волнового воздействия: бухты, лагуны, небольшие эстуарии мелких тундровых рек и ручьев – накапливается тонкодисперсный материал. В зависимости от количества глинистых частиц, находящихся в современном донном осадке, в грунтоведческом отношении выделяются различные виды дисперсных связных грунтов: супеси, суглинки и в меньшей степени глины.

Инженерно-геологические комплексы пород, за исключением глинистых илов, выдержанные по горизонтали и по вертикали, отсутствуют: весь прибрежный седиментогенез полностью подчинен геоморфологическим факторам осадкообразования: типу побережья, уклону дна и гидрологическому режиму акватории. Вне зоны активного волнового воздействия происходит образование современных глинистых осадков.

Глава 4. Состав, строение и свойства морских органо-минеральных грунтов

В каждом разделе главы 4 на основе всестороннего рассмотрения геологического строения территории, геоморфологического положения, фациальной принадлежности приводится сравнительный анализ изученных объектов – морских органо-минеральных илов. В главе рассматриваются и анализируются гранулометрический и минералогический составы морских органо-минеральных грунтов, их физические, физико-химические, механические, геохимические и биохимические свойства. Особое внимание уделено вопросам микростроения донных грунтов, минералогического состава илов, роли органического вещества в осадочном процессе и установлению стадийности седиментационных и постседиментационных изменений в грунтовой толще. Приводится сравнительный анализ изученных объектов, и обсуждаются влияние и роль главенствующих факторов на формирование физико-химических свойств илов.

Физико-механические свойства. *Северо-охотоморский шельф.* Донные грунты представлены в основном илами глинистыми, суглинистыми и супесчаными. Ил глинистый встречен на всем протяжении профилей-связок и на опорных площадках. Грунт зеленовато-серого и серого цвета, текучий с редким включением мелкой хорошо окатанной галькой и гравия, с линзами (3-6 см) песка различной крупности от пылеватого до гравелистого. Характеризуется высокими показателями природной влажности до 165%, пористости до 83% и пластичности до 55. Значения плотности грунта и плотности скелета ила напротив

невелики 1,27-1,82 г/см³ и 0,49-1,05 г/см³ соответственно. Число пластичности колеблется от 0,17 до 0,55. Показатель текучести достигает значений 2,45-2,55. Механические свойства изученных илов отличаются крайне низкими значениями: $c=0,015-0,017$ МПа, $\varphi=5^\circ$, $E=0,8-0,9$ МПа, что указывает на их низкую несущую способность и очень высокую степень сжимаемости.

Отмечается изменение свойств илов в зависимости от глубины акватории. Так с увеличением глубины моря с 87 до 130 м происходит увеличение значений естественной влажности с 57 до 139% пористости с 60 до 89% и коэффициента пористости с 1,52 до 3,50. И наоборот, происходит закономерное снижение значений величин плотности грунта с 1,65 до 1,33 г/см³ и плотности скелета грунта – 1,05 до 0,56 г/см³. Это связано с увеличением с глубиной моря пелитовой составляющей в илах и, следовательно, меньшей степенью дегидратации грунтов. Закономерностей в изменении физико-механических свойств илов по латерали не выявлено. На всем протяжении профилей-связок (417 км) отмечаются незначительные вариации гранулометрического состава и показателей свойств: $W_e=123-144\%$, $I_p=38-47$, $e=3,05-3,50$, $p_d=2,47-2,52$ г/см³, $p_s=1,34-1,38$ г/см³, $c=0,009-0,012$ МПа, $E=0,8-0,9$ МПа, $\varphi=5^\circ$. Эти вариации связаны с тремя основными факторами; глубиной акватории, разными скоростями терригенного осадконакопления и удаленности от источников питания – мелких рек изобилующих на примыкающем к морю побережью материка.

Шельф залива Терпения. Донные осадки на изученных площадках шельфа залива сложены исключительно илом глинистым. Это массивный неслоистый зеленовато-серый цвета грунт текучей консистенции. Нижний горизонт имеет коричневатый оттенок. Весь вскрытый интервал отмечен следами жизнедеятельности илоедов. Встречаются остатки растительных тканей, раковины моллюсков различной степени сохранности, хорошо мелкая окатанная галька и гравий. Глинистые илы имеют влажность до 170% и пористость 66-70% при плотности грунта 1,35-1,56 г/см³. Плотность частиц грунта 2,59-2,65 г/см³. Глинистая и пылеватая фракции доминируют в гранулометрическом составе и дают в сумме до 95%. Как и на северо-охотоморском шельфе отмечается батимальная зональность физико-механических характеристиках в поверхностном слое илов. Так от Лебяжинской площади (50 м) к Найбинской (70 м) увеличивается естественная влажность с 94 до 150%, пористость и соответственно уменьшается плотность с 1,50 до 1,35 г/см³. Большое значение для формирования физико-механических свойств грунта имеет удаленность от источника поступления материала в бассейн седиментации. Сравнения физико-химические свойства илов Найбинской и Арсентьевской площадей выяснилось, что находящаяся ближе к основному источнику питания терригенным материалом шельфа залива Терпения – устью реки Поронай (твердый сток 300 тыс. т/год) Найбинская площадь имеет большие значения W_E , n и меньшие p по сравнению находящейся мористее и удаленнее Арсентьевской. Налицо зонально-географический фактор в формировании свойств илов.

Шельф залива Анива. Голоцен-современные морские отложения представлены илом глинистым текучим зеленовато-серого цвета, с содержанием органического вещества до 5%. Отмечается присутствие единичной гальки и створок моллюсков. В гранулометрическом составе илов повсеместно преобладает пылеватая (до 49%) и глинистая (до 45%) фракции. Изученным органо-минеральным грунтам присуща влажность до 115%, пористость до 75%. Детальный анализ колонок донных илов всех регионов шельфа Охотского моря показал, что на всех без исключения площадях наблюдается закономерное уменьшение влажности, пористости и возрастание плотности с глубиной. Например, на Кухтуйской площади (Северо-охотоморский шельф) W_E от 147 до 119%, n от 77,8-74,5% и p от 0,54 до 0,63 г/см³. Кроме этого заметное изменение отмечается в гранулометрическом составе: происходит постепенное уменьшение процентного содержания алевроитовой и пелитовой фракций с одновременным увеличением мелкопесчаной («огрубление» состава). Восточно-Анивская площадь: 0.05-0.005 мм – 48,7-41,3%, менее 0.005 мм 45,0-35,7%. Эти изменения связаны с гравитационным уплотнением илов и их дегидратацией (отжатием иловой воды и увеличением жесткости осадка) под весом вышележащего слоя грунта.

Белое море. В целом при поинтервальном анализе разреза донных осадков сверху вниз наблюдается классическая картина уменьшения величин физико-химических показателей (W_e - с 195 до 140%, I_l с 5,44 до 1,65), что связано с уменьшением количества свободной воды в грунтовой системе. Физические характеристики осадка такие, как плотность, наоборот закономерно увеличивается (от 1,18 до 1,35 г/см³), что связано с уменьшением порового пространства (величина пористости уменьшается с 88 до 79%) и уплотнением осадка под действием вышележащих горизонтов илов вследствие непрерывного процесса седиментации. В исследованной секвенции илов содержание $C_{орг}$ вниз по разрезу уменьшается с 7,7 до 2,9%, что существенно даже для полярного литогенеза. При этом происходит снижение общего количества органического вещества в осадочном материале, зависящего от c_s (зримая тенденцию к увеличению от 2,57 до 2,68 г/см³). Причем гранулометрический состав илов с увеличением глубины практически не изменяется, следовательно, главная причина увеличения плотности частиц осадка - уменьшение содержания $C_{орг}$.

Море Лаптевых. Опробование верхней части разреза бухты Моржовая проходило во всех трех сегментах выделенных геоморфологических элементов. Следует отметить, что условия седиментации (и как ее отражение – строение верхней части секвенции донных осадков до вечномерзлых пород – 0,3-1,0 м) в каждом из выделенных трех сегментах бухты имеет свою специфику. Геоморфологическое строение дна бухты достаточно сложное: многочисленные локальные понижения в виде седиментационных ванн, соединенных между собой каналами стока (на осушке) и подводными желобками (на акватории), затрудняют восстановить целостную картину осадконакопления. Единственным повсеместно распространенным горизонтом, который можно достаточно целостно охарактеризовать – современные алевро-пелитовые илы, практически полностью сплошным чехлом покрывают дно бухты. В «стоп-воду» отчетливо заметна взвесь («осадочный туман») высотой до 2-3 см в виде полупрозрачной глинистой суспензии, находящейся над локальными седиментационными ваннами.

В зоне Ia – под тундровыми почвами (до 7 см) залегают маломощные супесчано-суглинистые отложения (до 30 см) коричневатого-серого цвета со щебнем и дресвой. Весь накопленный в аквальный период формирования отложений материал был полностью дегидратирован, уплотнен, локально эродирован поверхностными водотоками. Зона Ib – периодически затапливаемая во время сизигийного прилива, где собственно и формируются современные донные отложения. 0.0 ≈ 0.3 см – коричневатая-охристая придонная глинистая суспензия. 0.3 – 3.0 см – ил серовато-зеленый, серый и оливково-болотный, глинистый, текучий, водонасыщенный. Граница с нижележащим слоем резкая. 3.0 – 8.0 см – ил черный суглинистый комковатый. 8.0 – 8.5 см – суглинок серо-черный, мягкопластичный, водонасыщенный. Переход в нижележащий слой постепенный (3-5 мм). 8.5 – 20.0 см – супесь серовато-зеленая, песчаная водонасыщенная. 20.0 – 35.0 см – песок среднезернистый. Низы горизонта представлены песком крупнозернистым и гравелистым, с единичной плохоокатанной галькой и щебнем триасовых аргиллитов. 35.0 – 37.0 см – щебень с супесчаным заполнителем. 37.0 см ↓ – вечная мерзлота. Отмечается увеличение мощности глинистых осадков от берега бухты к ее центру, связанное с более длительным периодом пребывания центральной части под водой. Литологическое строение зоны Ib во многом схоже с зоной Ia, но с двумя существенными отличиями: отмечается существенное увеличение мощности алевро-пелитовых илов (скв. 7 – до 11 см в самой глубоководной точке) и отсутствием между придонной суспензией и черным суглинистым илом прослоя ила серого глинистого. Это связано, на наш взгляд, с периодическим выходом донного осадка в зоне Ib в субэральные условия с последующим интенсивным окислением.

Таблица 3. Показатели физико-механических свойств илов по профилям-связкам (северо-охогоморский шельф).

Профиль-связка	W _e , %	W _L , %	W _p , %	I _p	I _L	p _s , г/см ³	p, г/см ³	n, %	e	c, МПа	φ, град	E, МПа
Билибинская-Лисянская	126	109	65	44	1,37	2,50	1,38	76	3,09	0,013	3	0,9
Лисянская-Хмитевская	144	121	74	47	1,48	2,47	1,34	77	3,50	0,009	2	0,8
Хмитевская-Магаданская	123	101	63	38	1,56	2,52	1,38	75	3,04	0,014	3	0,9

Таблица 4. Показатели физико-механических свойств илов горизонта 0.0-0.5 м. (сахалинский шельф, залив Терпения).

Площадь	W _e , %	W _L , %	W _p , %	I _p	I _L	p _s , г/см ³	p, г/см ³	n, %	e	c, МПа	φ, град	E, МПа
Лебяжинская	94	71	39	32	1,73	2,68	1,50	71	2,48	0,003	1	0,6
Найбинская	150	109	58	51	1,84	2,63	1,35	80	3,90	0,001	0	0,5
Вахрушевская	136	96	48	48	1,81	2,59	1,41	75	2,93	0,002	0	0,5
Арсентьевская	94	72	40	32	1,72	2,63	1,49	70	2,39	0,006	1	0,7

Таблица 5. Показатели гранулометрического состава и физико-химических свойств илов Охотского моря

Горизонт, м	We, %	W _L , %	W _p , %	I _p	I _L	ρ _s , г/см ³	ρ, г/см ³	n, %	e	C _{опт} , %	СБ, мг/г	Гранулометрический состав, в % к весу						
												1,0- 0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,005	
Сахалинский шельф, залив Анива, Восточно-Анивская площадь																		
0,5	113	184	46	38	1,82	2,65	1,40	75	3,03	9,1	61	0,1	0,3	2,3	4,8	20,9	27,8	45,0
1,0	110	81	45	36	1,83	2,65	1,42	74	2,93	7,7	56	0,2	0,5	5,0	3,8	20,1	27,3	43,1
2,0	94	70	39	31	1,78	2,66	1,48	70	2,50	5,1	40	0,2	1,0	9,9	7,8	18,2	21,6	41,3
3,0	77	58	32	26	1,77	2,65	1,56	66	2,02	4,7	29	0,3	2,2	19,6	9,7	15,9	19,7	32,6
4,0	63	53	32	21	1,62	2,66	1,60	62	1,69	4,7	17	0,3	3,4	22,6	10,6	13,0	17,4	32,7
Сахалинский шельф, залив Терпения. Арсентьевская площадь																		
0,5	94	72	40	32	1,75	2,63	1,49	71	2,39	8,1	60	0,1	0,3	0,8	4,8	35,2	21,6	37,2
1,0	89	66	38	28	1,84	2,65	1,51	69	2,34	7,7	47	0,2	0,4	1,4	5,0	35,1	20,5	37,4
2,0	84	64	36	28	1,69	2,66	1,54	68	2,18	6,3	24	0,2	0,5	2,2	8,1	32,3	20,6	36,1
3,0	82	62	34	28	1,72	2,66	1,55	68	2,12	6,0	18	0,2	0,6	2,6	6,6	32,9	20,6	36,5
4,0	79	62	34	28	1,66	2,67	1,56	67	2,04	4,9	15	0,5	0,6	2,5	7,3	32,8	20,2	36,4
Северо-охотоморский шельф, Кухтуйская площадь																		
0,5	147	129	83	46	1,39	2,43	1,31	78	3,53	11,3	63	0,3	1,0	3,3	0,6	19,6	27,2	48,0
1,0	147	124	84	40	1,54	2,43	1,32	78	3,53	10,4	57	0,2	0,7	4,7	1,2	17,9	27,1	46,2
1,5	139	124	81	42	1,48	2,42	1,33	78	3,37	9,0	43	0,5	2,7	6,2	0,6	19,6	24,9	45,5
2,0	123	115	77	38	1,35	2,45	1,35	76	3,16	9,1	38	0,4	2,0	6,6	2,1	19,0	24,9	45,0
2,5	119	98	68	30	1,48	2,51	1,39	75	2,96	7,9	23	0,5	2,9	8,1	2,1	23,3	23,8	39,4

Схожая картина осадконакопления наблюдается в бухте Отмелая залива Нордвик. В бухте отсутствует система перпендикулярных кос, дно плавно понижается в сторону залива, хорошо прикрыто с востока косой от эродирующих морское дно вдольбереговых течений, а условия седиментации способствовали более мощному (до 33 см) накоплению глинистого осадочного материала. Кроме этого отмечается существенно большее количество глинистой суспензии над осадком (до 5-8 см), которая иногда образует хлопьевидно-нитевидные образования. Верхняя часть разреза полностью повторяет аналогичный разрез зоны Ib бухты Моржовая, с той лишь разницей, что мощности выделенных слоев больше чем в бухте Моржовая.

Необходимо подчеркнуть, хотя по гранулометрическому составу все исследованные донные осадки относятся к алевро-пелитам, они существенно меняют свои физико-химические свойства (W_e , W_L , W_p , I_p , I_L) в зависимости от места нахождения в разрезе. По существу отмечен практически плавный переход в одном случае илов глинистых в супеси текучие (бухта Моржовая), а в другом илов глинистых в суглинки текучие (бухта Отмелая) (табл. 6). В осадках обеих бухт переход одного типа грунта в другой сопровождается закономерным уменьшением содержания $C_{орг}$ (с 4,3 до 1,7%), что является еще одним подтверждением разделения грунтов на органико-минеральные и минеральные по содержанию $C_{орг}$ порогом 3%. В бухте Моржовая граница перехода фиксируется ≈ 8 см, а в бухте Отмелая ≈ 15 см.

Отмеченная тенденция в изменении показателей свойств осадка полностью согласуется с классической схемой. Во всех изученных колонках обеих бухт по глубине залегания происходит закономерное снижение естественной влажности осадка – We (Моржовая с 103 до 19%; Отмелая 375 до 60%), содержания органического вещества – $C_{орг}$ (Моржовая с 3,3 до 1,8%; Отмелая 4,3 до 1,7%) и, наоборот, увеличение плотности с (Моржовая с 1,25 до 1,40 г/см³; Отмелая с 1,07 до 1,39 г/см³).

Минералогия илов. Для выяснения минерального состава илов был проведен рентгеноструктурный анализ пелитовой и субколлоидной фракций. Глинистые минералы изученных илов *Охотского моря* представлены смектитом (55-61%), гидрослюдой (21-33%) и хлоритом (9-15%). Постоянной примесью глинистой фракции является каолинит. Смектитовая составляющая глинистой фракции неоднородна: фоновым является минерал, структура которого близка к монтмориллонитовой. Наряду с монтмориллонитом практически везде есть смешаннослойные образования гидрослюда-монтмориллонитового состава с преобладанием межслоев монтмориллонитового типа, причем их количество колеблется от 50 до 80%. Генетическая связь смешаннослойных и гидрослюд несомненна: чем больше смешаннослойных в составе смектитовой составляющей, тем меньше и несовершеннее структура гидрослюд.

Заметное изменение в составе глинистых минералов происходит по глубине осадка. В среднем до глубины 1.5 м. наблюдается увеличение содержания гидрослюд, улучшение их окристаллизованности. Параллельно уменьшается количество смешаннослойных, а в их составе монтмориллонитовых пакетов. Глубже до глубины 2.5 м заметна «монтмориллонитизация» глинистой фракции: увеличение количества смектита, а в их составе смешаннослойных. В более глубоких горизонтах изменяется состав поглощенного комплекса смектитов: наряду с двухвалентными катионами в составе обменных катионов заметную роль начинает играть Na^+ . Все перечисленные выше изменения заставляют предположить, что основную роль в процессе трансформации глинистых минералов играют диагенетические процессы. Этот процесс можно объяснить тем, что в морской седиментационной обстановке монтмориллонит за счет трансформации в условиях слабовостановительной обстановки частично преобразуется в диоктаэдрический хлорит. Это происходит в результате формирования в межслоевых промежутках первичного минерала содержащего группировки из обменных катионов Na^+ и Ca^{2+} и молекул воды.

При анализе дифрактограмм глинистой фракции верхнего слоя илов северо-охотоморского шельфа по профилю-связке Хмитевская-берег в зависимости от глубины

моря отмечается определенная зональность в процентном содержании трех групп минералов (гидрослюда, смешаннослойные монтмориллонитового типа и хлорит). Если содержание хлорита в илах не зависит от того, на какой глубине моря находится грунт, то с увеличением глубины моря (от 80 до 130 м) относительное уменьшение содержания гидрослуд сопровождается увеличением количества подвижных межслоев в составе смешаннослойных монтмориллонитового типа (с 25 до 70%).

Белое море. Предварительные исследования осадка (фазовый анализ) показали, что наиболее информативной для изучения глинистых минералов является фракция <0.005 мм, поэтому основное внимание было сосредоточено на анализе именно этой фракции илов. Фазовый рентгеновский анализ илов бухты Никольской Белого моря показал, что все образцы состоят из полиминеральной смеси, основные компоненты которой представлены аморфным кремнеземом, иллитом, хлоритом, смешаннослойными образованиями, смектитом, кварцем, полевым шпатом. В качестве постоянной примеси отмечается присутствие амфибола, гетита и неупорядоченно-смешаннослойных образований типа «иллит-смектит» и «хлорит-смектит» (возможно, набухающий хлорит).

Глинистые минералы бухтовых илов беломорского шельфа представлены всеми основными группами: иллит (55-76%), хлорит (8-12%), иллит-смектит (8-26%) с содержанием набухающей составляющей 10-15%. Кварц – диагностирован по рефлексам с $d = 4.25, 3.34, 2.45$ и 1.97E и использован в качестве внутреннего эталона. Полевой шпат – преимущественно плагиоклаз, для которого характерен рефлекс с $d=4.04$ и 3.19E , не меняющий своего положения при гликоляции препаратов. Примесь амфибола, предположительно роговой обманки, характеризуется наличием рефлексов с $d = 8.48$ и 3.14E . На наличие гетита указывают слабые всплески с $d = 4.19\text{E}$.

Смектит выявлен по слабым всплескам с $d = 12.2\text{E}$ и по появлению 17E рефлекса после насыщения препаратов этиленгликолем (лучше всего проявился в пробах с уровнями 0,05-0,5 см, 0,5-1 см, 1-6 см, 6-12 см). Такое смещение рефлекса указывает на его «одновалентную» K-Na – разновидность. Как мономинеральная фаза отмечается сравнительно редко, в отдельных горизонтах, его содержание не превышает 4%. Для иллита характерно наличие хорошо различимых рефлексов с $d = 10.1, 4.98, 3.34, 2.51\text{E}$. Изменение полуширины и интенсивности базального рефлекса 001 после насыщения пробы этиленгликолем указывает на наличие набухающей составляющей типа иллит-смектит.

В целом по разрезу до глубины 50 см наблюдается некоторая тенденция к уменьшению содержания иллита с видимым улучшением его окристаллизованности на глубине 1-6 см. Наибольшая вариативность по разрезу отмечается в содержании смешаннослойных образований иллит-смектит (5-26%). Количество смектитовых пакетов в составе смешаннослойных образований непостоянно и, видимо, зависит от локальной геохимической обстановки в той или иной точке разреза, а также от химического состава, количества и степени разложения органического вещества.

Хлорит определен по рефлексам $d = 14.2, 7.08, 4.74, 2.82\text{E}$. Судя по соотношению интенсивностей базальных отражений, представлен (Mg-Fe) разновидностью Отражение 002 имеет явную асимметрию в сторону малоугловой области. Следует отметить незначительное смещение рефлексов хлорита при насыщении этиленгликолем, что свидетельствует о его некоторой набухаемости. В качестве предположения, можно отметить неявную частичную тенденцию к деградации хлорита (обратной трансформации), связанную с окислением Fe^{2+} в Fe^{3+} и его гидратацией, с образованием дефектов в структуре и формированием неупорядоченной смешаннослойной фазы хлорит-смектит. Количество хлорита по разрезу практически не меняется и варьирует в пределах 8-14%, что еще раз подтверждает тезис о стабильном и равномерном поступлении осадочного материала в бассейн седиментации без существенных отрицательных и положительных экстремумов.

Генетическая связь смектита, неупорядоченных смешаннослойных образований (иллит-смектит и хлорит-смектит) и иллита не вызывает сомнений: чем больше набухающая (смектитовая) составляющая в составе смешаннослойных минералов, тем несовершеннее их

Таблица 6.

Показатели гранулометрического состава и физико-химических свойств донных осадков бухт море Лаптевых

Глубина отбора, см.	We, %	W _L , %	W _p , %	I _p	I _L	ρ _s , г/см ³	ρ, г/см ³	n, %	e	C _{орг} , %	Гранулометрический состав, в % к весу									
											2.0-1.0	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.002	<0.002	
											1.0	0.5	0.25	-0.1	0.05	0.01	0.005	0.002		
бухта Моржовая																				
0-3	103	48	30	18	4,06	2,76	1,25	78	3,482	3,3			4,5	7,3	15,9	40,2	13,8	11,3	7,0	
3-7	74	40	32	8	5,25	2,71	1,26	73	2,742	3,1			0,4	10,4	15,9	39,9	13,8	12,3	7,3	
8-12	47	31	26	5	4,2	2,69	1,33	65	1,825	2,8			0,1	13,5	16,8	43,4	11,4	10,3	4,5	
13-16	22	23	19	4	1	2,69	1,36	60	1,488	1,9	3,7	3,5	13,1	19,6	11,1	24,7	10,0	9,5	4,8	
18-22	19	21	17	4	1,25	2,69	1,40	59	1,413	1,8	4,0	4,0	15,4	20,8	10,9	24,7	10,3	9,2	4,7	
залив Нордвик, бухта Отмелая																				
0-1	375	71	50	21	11,68	2,71	1,07	93	8,076	4,3			2,0	10,7	8,6	35,7	16,8	15,5	10,7	
3-5	224	51	35	16	11,81	2,75	1,04	88	7,567	3,3				3,1	10,8	37,6	19,5	18,7	10,3	
9-15	104	39	28	11	6,91	2,72	1,12	80	3,954	3,0				3,7	7,4	39,9	20,1	16,3	12,6	
20-25	85	54	42	12	3,58	2,73	1,31	74	2,855	1,9			2,4	10,5	7,2	35,7	18,5	13,6	12,1	
35-40	60	34	25	9	3,89	2,71	1,39	68	2,119	1,7	0,1	0,1	4,6	9,6	11,8	38,7	16,9	13,8	10,5	

структура, что связано с их высокой дисперсностью и, как следствие, их химической, а также структурной деградацией.

Минеральный состав алевро-пелитовых илов бухт заливов моря Лантевых характеризуется минеральными ассоциациями, практически полностью повторяющими минеральный состав горных пород сопредельной суши. В донных осадках бухты Моржовая слоистые силикаты представлены слюдами, хлоритом и каолинитом. Слюды диагностируются по пику 10.0 Е и целочисленной серии отражений, стабильных после насыщения этиленгликолем. Интенсивное отражение с d/n 5.0 Е указывает на присутствие диоктаэдрической разности. Хлорит идентифицирован по стабильному положению пика 14.2 Е после насыщения этиленгликолем и целочисленной серии отражений. На наличие каолинита в присутствии хлорита указывает раздвоенность пика в области 3.54 (хлорит) – 3.58 (каолинит) Е. Помимо слоистых силикатов повсеместно присутствуют кварц и полевые шпаты.

Набор минералов в донных осадках бухты Отмелая залива Нордвик отличается присутствием «сметитовой фазы», диагностируемой по наличию пика с величиной $d/n \geq 17 \text{ \AA}$ после насыщения этиленгликолем. Определение ее состава по имеющимся данным затруднительно: она может быть представлена как индивидуальными сметитами, так и смешанослойными образованиями с высоким (> 50%) содержанием сметитовых пакетов. Однако отсутствие отражения d_{002} указывает на то, что присутствие смешанослойного образования в образцах более вероятно, чем индивидуального сметита. Появление сметитовой фазы обусловлено трансформацией хлорита и соответственно «сметитовая фаза» может быть идентифицирована как смешанослойное неупорядоченное хлорит-сметитовое образование. В небольшом количестве, как примесь, по асимметрии отражения с d/n 10.0 Е, исчезающей после насыщения образцов этиленгликолем, диагностируется присутствие небольшого количества смешанослойного неупорядоченного слюда-сметитового образования с низким содержанием сметитовых пакетов. Как и в осадках бухты Моржовая идентифицированы кварц и полевые шпаты.

На уровне тенденции отмечена лучшая окристаллизованность слоистых силикатов и их большее содержание в донных осадках бухты Отмелая залива Нордвик по сравнению с таковыми бухты Моржовая. Значительных изменений в минеральном составе по глубине осадка не отмечено. Однако отмечается постепенное увеличение доли хлорита по отношению к каолиниту с глубиной осадка (Моржовая). В донных осадках бухты Отмелая соотношение хлорита и каолинита примерно одинаковое.

Геохимия. Для выяснения более полной картины формирования осадков была проведена оценка в воднорастворимой фазе осадков активностей ионов галогенов (F^- , Cl^- , Br^- и I^-) а также ряда сопутствующих анионов (NH_4^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) и катионов (Fe^{3+} , Cu^{2+}). Анализы проводились прямым потенциометрическим методом с использованием ион-селективных электродов и стандартных методик. Особое внимание при этом было обращено на поведение галогенов, в первую очередь это касалось геохимии йода и брома. Хорошо известно, что органическое вещество морских осадков обогащено йодом и в меньшей степени бромом, и считалось, что поведение именно этих элементов в первую очередь будет отражать изменения в системе поровые растворы – осадочный материал на разных этапах его формирования. Это предположение подтверждается литературными данными, свидетельствующими о том, что в процессе диагенеза йод перераспределяется из органического материала в поровые растворы и таким образом может играть существенную роль при характеристике степени диагенеза. Кроме того, дальнейшая история йода и брома в ходе формирования осадка может приобретать различные черты при изменении окислительно-восстановительного потенциала системы, поскольку на фоне широкой области устойчивости бромида иона в природных условиях, йод может проявлять различные формы нахождения в различных степенях окисления.

Рассмотрение геохимических данных показывает, что наблюдается отчетливое изменение состава воднорастворимой части порового пространства глинистых осадков в процессе их

раннего диагенеза. Как и ожидалось, наиболее четкая взаимосвязь (коэффициент корреляции – 0,90) наблюдается между потенциалом йодид иона (J_{EDS} , mV) и общим количеством органики в осадках ($C_{орг}$, %): $J_{EDS} = 0,125 C_{орг} + 3,49$. Неожиданно высоки и статистически значимы оказались корреляции между потенциалом фтора и основными индикаторными параметрами диагенеза – содержанием органического вещества в осадках и их естественной влажностью.

Факторный анализ всей совокупности геохимических данных методом главных компонент показал, что основную часть (68%) изменчивости рассматриваемой системы можно объяснить вариациями трех ассоциаций геохимических параметров: 1 – (J , NH_4), 2 – (F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , pH, Eh), 3 – (Br^- , Cl^- , Cu^{2+} , Fe^{3+}).

Ассоциация (корреляция) йода с аммонием – хорошо известный факт, отражающий процесс освобождения этих компонент при деструкции азотсодержащего органического вещества. Доминирующая роль ионов фтора в ассоциации (F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , pH, Eh), отражает, по-видимому, процессы перераспределения элементов в системе поровые растворы – фторсодержащие слоистые минералы глинистой фракции на общем фоне изменения окислительно-восстановительных условий в поровом пространстве осадков в ходе их диагенетических преобразований. Ассоциация (Br^- , Cl^- , Cu^{2+} , Fe^{3+}) отражает, в первую очередь, общую минерализацию поровых вод, роль которой, возможно, лимитируется процессами выделения воды (наряду с йодом и аммонием) при деструкции органического вещества.

Микростроение. Микроструктурные исследования проводились на образцах илов Охотского и Белого морей, причем наиболее значимые результаты получены при исследовании последних.

Микроструктурные исследования (качественный и количественный анализ) проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450 VP с гарантийным разрешением 3.5 нм, на образцах морских органо-минеральных грунтов методом моментальной криогенной заморозки. В результате впервые в мировой практике были получены изображения микростроения морских грунтов в интервале глубин от 0 до 50 см, т.е. в пограничной зоне «взвесь-осадок»

Качественный анализ микроструктуры илов Белого моря осуществляли по РЭМ-изображениям при двух увеличениях: малом (250-500 крат) и большом (4000-8000 крат). В первом случае получают обзорные изображения, дающие общие представления о микроструктуре образца: наличие крупных песчаных и пылеватых зерен, крупных пор, характер взаимоотношения вмещающей тонкодисперсной глинистой матрицы и более грубодисперсного материала, ориентация структурных элементов. Во втором случае наблюдаются тонкие детали микростроения, такие как размер и форма структурных элементов, характер их поверхности, тип контактов между глинистыми частицами и их микроагрегатами.

Количественный анализ микроструктуры глинистых грунтов проводится по РЭМ-изображениям с помощью программного обеспечения (ПО) «STIMAN 3D», который в качестве исходной информации использует серию разномасштабных РЭМ-изображений, охватывающих весь диапазон изменения размеров встречающихся структурных элементов. Были получены практически все морфологические показатели микроструктуры: размер и форму структурных элементов (пор и частиц), их ориентацию в пространстве, что в свою очередь позволило оценить величину пористости и удельной поверхности, а также основные классификационные показатели микроструктуры: степень крупности структурных элементов и их ориентации в пространстве и по ним классифицировали типы микроструктур исследуемых осадков.

Микроструктура всего исследованного интервала илов сложена хаотически расположенными в пространстве обломками кремнистых скелетиков диатомовых водорослей и радиолярий разной степени сохранности. При больших увеличениях видно, что отдельные пластинчатые обломки контактируют по типу базис-скол, образуя типичную

коагуляционную ячеистую микроструктуру (рис. 2а). Размер обломков изменяется от 0.1 до 50 мкм. Некоторые из обломков образуют микроагрегаты изометричной, округлой формы. Редко встречаются зерна кварца и полевого шпата угловатой формы. Размер зерен изменяется от 20 до 30 мкм. Микроструктура очень рыхлая и высокопористая. Присутствуют микроагрегаты с сочленением глинистых частиц по типу «скол-скол» (пространственный кубический «карточный домик») (рис. 2б). В целом на всех РЭМ-изображениях отсутствует какая-либо доминирующая ориентация твердых структурных элементов в образце.

Проведенные исследования показали, что в микроструктуре всех исследованных образцов можно выделить 4 категории пор: D_1 – межчастичные ультрамикropоры; D_2 – тонкие междультрамикроагрегатные микropоры; D_3 и D_4 – мелкие и крупные межмикроагрегатные микropоры. Такие типы пор обычно выделяют в глинистых породах, сложенных преимущественно микроагрегатами глинистых частиц.

Из данных количественного анализа следует, что в поровом пространстве всех образцов по количеству преобладают самые маленькие межчастичные ультрамикropоры D_1 . Однако, из-за малых размеров пор их вклад в общую пористость наименьший и составляет всего 0.6-1.1%. Максимальный вклад в поровое пространство вносят мелкие межмикроагрегатные микropоры (D_3) – до 62.1%, меньший объем занимают крупные межмикроагрегатные микropоры (D_4) – до 34.1%. Вклад междультрамикроагрегатных микropор (D_2) изменяется незначительно и составляет 8.1–8.9%. Согласно расчетам, следует, что несмотря на очень небольшой интервал отбора образцов (всего 0.5 м), по мере возрастания глубины их отбора, наблюдается уменьшение общей пористости осадков $n_{из}$, измеренной по РЭМ-изображениям от 49.30% до 40.58%.

Тенденция уменьшения общей пористости с глубиной залегания осадка, даже в пределах 50-сантиметрового интервала глубин, сопровождается уменьшением максимального размера пор (D_{max}) от 35% на глубине 3 мм, до 19% – на глубине 50 см. Помимо этого происходит сокращение вклада крупных межмикроагрегатных микropор (D_4) с 34 до 27%, которое обуславливает соответствующее возрастание мелких

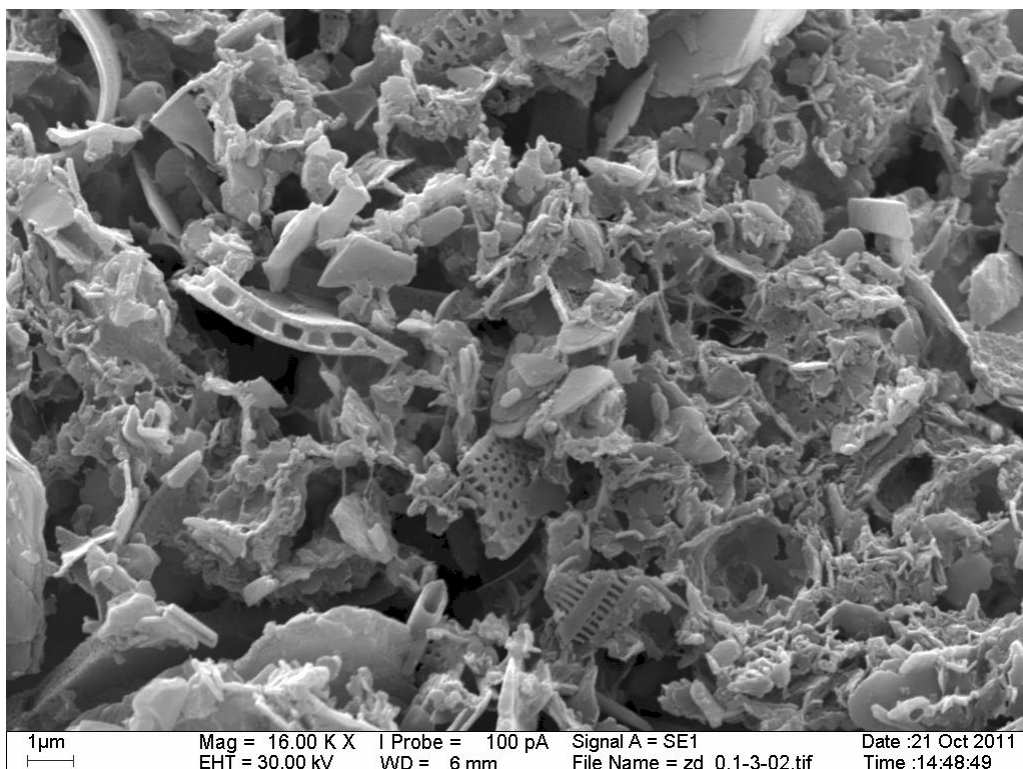


Рис 2а. Ячеистая коагуляционная микроструктура

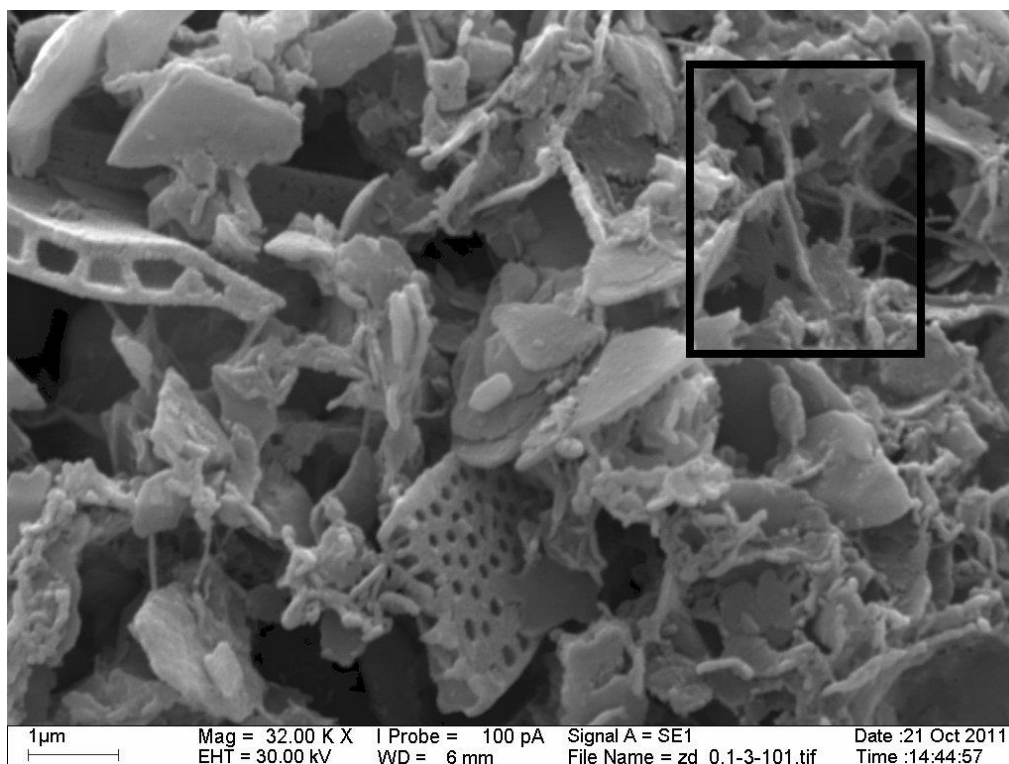


Рис 2 б. Контакты глинистых микроагрегатов по типу «скол-скол» (пространственный кубический «карточный домик»), х 8000

межмикроагрегатных микропор (D_3) с 56 до 62%. Описываемые процессы пока не затрагивают какие-либо значительные изменения содержания наиболее мелких категорий пор – межчастичных ультрамикропор (D_1) и межультрамикроагрегатных микропор (D_2). Анализ интегральных показателей микроструктуры (D и A), а также данных о характере структурных связей между твердыми структурными элементами позволил установить, что большинство в исследованных илов относятся к классу тонкодисперсных микроструктур «А», подклассу слабоориентированных «I» и группе – коагуляционных микроструктур «к», т.е. микроструктура тонкодисперсная, слабоориентированная, коагуляционная – АIк.

Органическое вещество. Для понимания истинного количества содержания органического вещества в донных осадках была применена разработанная автором методика определения этого показателя, которая вошла в общефедеральный нормативный документ ГОСТ 23780-2016 «Грунты. Методы определения содержания органических веществ». Кратко суть метода заключается в классическом озолении навески грунта при определенной температуре (температура различна для различных видов грунта). Для аквальных органо-минеральных грунтов $T=350^{\circ}\text{C}$ в течение 2,5 часов. Зольность определяли как потерю веса при прокаливании отнесенную к первоначальной массе навески и выражали в процентах. При соблюдении такого термического режима величину – зольность можно принимать равной общему содержанию органических веществ в донных осадках.

В исследованной секвенции илов содержание $C_{орг}$ вниз по разрезу уменьшается с 7,7% (интервал 0,0...0,3 см) до 2,9% (интервал 50 см), (линейная зависимость $R^2=0.93$) что является существенным даже для полярного литогенеза, что позволило оценить плотность органического вещества в морских органо-минеральных грунтах – составляет 1,32 (+/- 0,05) г/см³.

Глава 5. Условия образования и стадийность формирования морских органо-минеральных грунтов

В главе 5 рассмотрены общие условия образования и эволюции органо-минеральных грунтов, обсуждается стадийность формирования глинистых грунтов в присутствии органического вещества, рассматривается эволюция состава и свойств отложений бухт,

вышедших на дневную поверхность вводится понятие «универсальный показатель трансформации осадка» Отстаивается позиция о биогенном механизме седиментогенеза.

Общие закономерности формирования и эволюции органо-минеральных грунтов. К настоящему времени сформулировано несколько теорий, в которых с различных понятийных и методологических позиций рассматривается стадийность формирования морских глинистых осадков (грунтов). Несмотря на их различия в целом все исследователи сходятся на общем мнении о наличии трех обобщенных стадий, соответствующих той или иной природной оболочке взвесь (гидросфера) – наиллок – донный осадок (литосфера). Вопрос идет лишь о критериях их выделения и физических константах их существования. Отметим, что подавляющее количество теорий опирается на разграничение процесса седиментогенеза и рассмотрении его исключительно как двухфазной среды (твердая-жидкая). Показатели (свойства) среды (за исключением W_e и c) выбраны субъективно, и не отражают реальную трансформацию грунтовой системы именно на стадии осаждения и структурирования осадка (донного грунта). Наиболее объективно и полно данный процесс рассмотрен В.И.Осиповым (для глинистых осадков в целом), С.А.Козловым, В.Н.Свальновым (океанические осадки), Г.И.Ивановым и А.А.Свертиловым (осадки шельфа).

Стадийность формирования глинистых осадков в присутствии органического вещества. Образование морских органо-минеральных грунтов – сложнейший физико-химический и биохимический процесс, на который влияет множество переменных факторов. В зависимости от того, под каким углом зрения рассматривается донный осадок, взгляды на стадии его формирования и процессы трансформации существенно разнятся у различных исследователей. По визуальному описанию, цвету, консистенции и состоянию всю рассматриваемую единую систему «гидросфера – литосфера» можно в общем виде разделить на три большие подсистемы, кардинальным образом отличающиеся друг от друга: «взвесь» – «суспензия» (наиллок) – «осадок» (грунт). Опираясь на работы В.И. Осипова (процесс формирования глинистого осадка состоит из четырех стадий: коагуляция, агрегация, структурообразование и физико-химическое уплотнение) основываясь исключительно на физико-химических свойствах грунта первого порядка (W_e , W_L , $C_{орг}$) детализировали генеральную схему формирования реальных природных глинистых грунтов. В результате исследований была предложена трёхкомпонентная модель формирования природных глинистых осадков (твердая, жидкая и биотическая), при анализе которой, появились соображения о моменте появлении четвертой (газовой) составляющей грунтовой системе. Основой предлагаемой схемы формирования природных органо-минеральных грунтов стала непрерывная секвенция илов, отобранных в августе 2007 г. (рис. 3, табл. 7).

I – «Биоминеральный снег» («морской снег» по А.П.Лисицину): от зеркала воды до -7.0 – (-3.0) мм (видимая в грунтовой трубке суспензия). Натурные водолазные работы визуально фиксируют величину этой стадии до 1.5-2.0 м. Количество воды многократно превышает количество минеральных частиц.

II – «Осадочное облако» (условная вода): -3 (-7) – -1.0 (-0.05) мм. Возрастание концентрации минеральных частиц. Количество воды становится примерно равной количеству минеральных частиц. «Осадочное облако» – верхняя часть системы гидросфера – седиментосфера.

III – «Осадочный туман» (суспензия): -0.05 – 0.0 мм. Начало процесса агрегации; действие дальних коагуляционных контактов (сотни E). Начало ориентации глинистых частиц (кубическая симметрия формирующегося осадка). Верхняя часть «наилка» в терминологии седиментологов.

Между первыми тремя стадиями физических границ нет: к ним применим термин – «горизонт событий». На первых трех стадиях $W_e > 5W_L$, $C_{орг} > 10\%$. Границы первых трех стадий могут (и отличаются) на наш взгляд количеством ОВ (атомы и отдельные молекулы растворенного органического вещества собственно и являются мостиками между глинистыми частицами). Далее следует собственно грунтовая толща, которую можно отнести к понятию литосфера.

IV – «Минеральная жидкость»: 0.0 – 5.0 (7.0) мм. Аллюмосиликатный гель (золь-гелевая фаза). Дальние коагуляционные контакты. $2W_L < W_e < 5W_L$, $10\% > C_{орг} > 7\%$. Со стадии IV начинается собственно «осадочное поле» т.е. то геологическое пространство, физико-химические параметры которого можно определить лабораторными методами исследований.

V – «Протогрунт» (центр грунта): 5.0 (7.0) – 17.0 (20.0) мм. Начало формирования ближних коагуляционных контактов (десятки Е). Начало синерезиса. $2W_L < W_e$, $7\% > C_{орг} > 5\%$.

VI – Ил органо-минеральный, черный: 17.0 (20.0) – 105 (112) мм. Начало разложения органического вещества (запах H_2S). Дальние коагуляционные контакты. Примазки зеленовато-серых илов. $2W_L > W_e > W_L$, $5\% > C_{орг} > 3\%$.

VII – Ил минерально-органический, серовато-черный: 105 (112) – 310 (320) мм. $W_e > W_L$, $5\% > C_{орг} > 3\%$.

VIII – Ил минеральный, зеленовато-серый, текучий, с единичными примазками (примесями) ила черного: 310 (320) – 460 (480) мм. $W_e \geq W_L$, $C_{орг} \geq 3\%$. Граница раздела илов и текучих глин.

IX – Глина серовато-зеленая, текучая: 460 (480) мм и ниже. $W_e \geq W_L$, $C_{орг} < 3\%$.

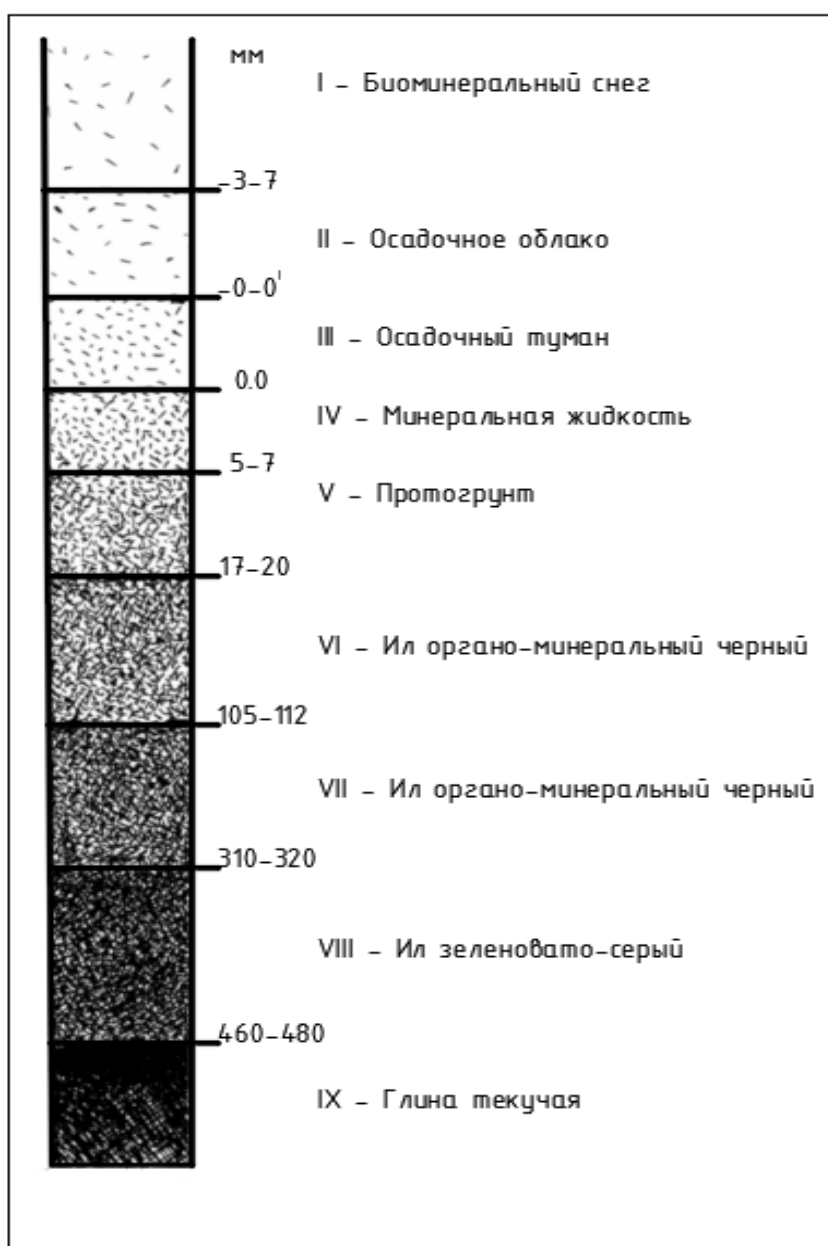


Рис. 3. Схема формирования органо-минеральных грунтов в бухтах Белого моря

Таблица 7

Белое море. Кандалакшский залив. Таблица физико-химических свойств илов по стадиям формирования.

Глубина отбора, см,	стадия	We, %	W _L , %	W _p , %	I _p	I _L	n, %	e	ρ, г/см ³	ρ _d , г/см ³	ρ _s , г/см ³	C _{орг} , %
-0,05-0,0	III	539	110	68	42	11,21	92	11,93	1,27	0,20	2,57	11,06
0,0-0,05	IV	235	109	69	40	4,15	85	5,73	1,29	0,39	2,59	8,89
0,05-1,0	V	205	102	67	35	3,94	84	5,15	1,3	0,43	2,62	6,85
1,0-2,0		181	90	68	22	5,14	82	4,64	1,31	0,47	2,63	6,47
2,0-3,0		170	90	67	23	4,48	81	4,38	1,32	0,49	2,63	5,63
3,0-4,0	VI	166	91	68	23	4,26	81	4,34	1,31	0,49	2,63	5,94
4,0-5,0		144	85	67	18	4,28	80	3,9	1,31	0,54	2,63	5,81
5,0-8,0		147	86	68	17	4,39	80	3,92	1,32	0,53	2,63	5,73
9,0-11,0		141	85	68	18	4,29	79	3,78	1,33	0,55	2,64	5,53
14,0-16,0		145	89	70	19	3,95	79	3,84	1,34	0,55	2,65	5,61
16,0-19,0		137	92	68	24	2,88	79	3,65	1,35	0,57	2,65	5,68
19,0-21,0		139	87	69	18	3,89	79	3,66	1,36	0,57	2,65	5,32
21,0-24,0	VII	124	91	70	21	2,57	77	3,33	1,37	0,61	2,65	5,30
24,0-26,0		123	94	69	25	2,16	77	3,34	1,36	0,61	2,65	5,22
26,0-29,0		118	93	69	24	2,04	76	3,22	1,37	0,63	2,65	5,18
29,0-30,0		116	92	70	22	2,09	76	3,15	1,38	0,64	2,65	5,06
34,0-35,0		112	95	71	24	1,71	75	3,07	1,38	0,65	2,65	4,86
35,0-36,0	VIII	98	98	71	23	1,00	73	2,76	1,4	0,71	2,66	4,79
36,0-39,0		96	95	70	25	1,04	73	2,69	1,41	0,72	2,66	4,83
40,0-42,0	IX	90	93	68	25	0,88	72	2,57	1,42	0,75	2,67	2,98

Принципиальным моментом в данной схеме на первых трех стадиях являются линейные величины (условные «мощности» стадий-горизонтов), а на последующих – физико-химические параметры осадочной среды, т.к. свойства илов напрямую зависят от определенной седиментационной обстановки и конкретных фациальных условий. В предлагаемой схеме формирования глинистого осадка первостепенное значение отводится органическому веществу и его последующим изменениям. Углеводы, благодаря своей разветвленной пространственной структуре, образуют OH^- мостики на сколах глинистых частиц, между которыми формируются ближние коагуляционные связи по высшей степени симметрии – кубической (или близко к кубической симметрии). Возможно это первый подвид ячеистой микроструктуры на самом раннем этапе формирования глинистого осадка (контакты по типу «скол-скол»).

По мере уменьшения расстояния между твердыми частицами грунта кубическая система трансформируется (наклонный параллелепипед → разрыв связей «скол-скол» → перемещение контактов по плоскости базиса при вхождении между контактами «скол-скол» фрагментов органического вещества с соблюдением полярности) и происходит образование H^+ -мостиков на базисах глинистых частиц (контакты «базис-скол»). При этом не рассматриваются участвующие в формировании микроструктуры илов электронейтральные твердые частицы: спикулы губок, панцири диатомей и радиолярий.

Параллельно протекает процесс разложения растворенного органического вещества. В одной его части OH^- и H^+ постепенно переходят из порового раствора во внешний диффузный слой и очевидно влияют на W_e и W_p , другая же недиссоциированная часть OB в последующем служит основой формирования молекул гуминовых кислот. Кроме этого, по-видимому, происходит активный процесс образования органо-минеральных коллоидов. В дальнейшем, с началом синерезиса и увеличением «жесткости» осадка, происходит концентрация OH^- и H^+ на границе раздела 1 и 2 слоев в двойном электрическом слое (что в данном контексте очевидно влияет на величину I_p). На первых трех стадиях $W_e > 5W_L$, $C_{орг} > 10\%$. Границы первых трех стадий отличаются количеством OB ; атомы и отдельные молекулы растворенного органического вещества являются мостиками между глинистыми частицами. На границах стадии IX-X наступает некое термодинамическое равновесие. Активные биохимические процессы затухают, и основное влияние приобретают физико-химические взаимодействия в системе «минерал-вода». Стадии формирования глинистых осадков представлены в табл. 8.

Таблица 8

Стадии формирования глинистых осадков

№ пп	Стадия	Цвет	Тип контактов	Органическое вещество ($C_{орг}$)	Физико-химические параметры
I	«Биоинеральный снег»	бурый	Начало ДКК*	$C_{орг} > 10\%$.	$W_e > 5W_L$
II	«Осадочное облако»				
III	«Осадочный туман»				
IV	«Минеральная жидкость»	черный	ДКК	$10\% > C_{орг} > 7\%$	$2W_L < W_e < 5W_L$
V	«Протогрунт»			$7\% > C_{орг} > 5\%$	$2W_L < W_e$
VI	Ил органо-минеральный			ДДК+БКК**	$5\% > C_{орг} > 3\%$

VII	Ил минерально-органический	серовато-черный		$5\% > C_{орг} > 3\%$	$W_e > W_L$
VIII	Ил минеральный	зеленовато-серый	БКК+ДДК	$C_{орг} \geq 3\%$	$W_e \geq W_L$
IX	Глина текучая	серовато-зеленый	БКК	$C_{орг} < 3\%$	$W_e \geq W_L$
X	Глина текучепластичная			$C_{орг} < 3\%$	$W_e \leq W_L$

*ДДК – дальние коагуляционные контакты, **БКК – ближние коагуляционные контакты.

Фундаментальной проблемой седиментологии является выбор критериев разделения пограничной системы придонного слоя «вода – донные осадки» (Benthic Boundary Layer), который в настоящее время из-за неопределенности литологической терминологии исследователи называют по-разному («придонный нефелоидный слой», «наилок», «жидкий флукулированный слой»), причем вне зависимости от названия, у данного природного объекта по сию пору отсутствуют строгие математические и физические характеристики.

В связи с этим возникает вопрос о введении в описание аквальных осадков некоего «универсального показателя трансформации», характеризующего степень изменения описываемой системы, и на основании которого становится возможным строгое математическое выделение (ранжирование) стадий процесса седиментогенеза с вполне конкретной терминологической базой.

При введении данный показатель должен удовлетворять ряду условий:

- распространяться на все природно-климатические зоны мира;
- не зависеть от скорости поступления осадочного материала в бассейн седиментации;
- не зависеть от минералогического и гранулометрического состава взвеси;
- не зависеть от гидродинамического режима акватории, включая скорость придонных течений;
- не зависеть от химического состава морской воды бассейна седиментации;
- применяться к осадкам шельфа (для океанических осадков и осадков открытого моря недостаточно репрезентативных данных).

Основой для введения *индекса трансформации осадка* ($I_{то}$) явился неоспоримый постулат, что «донный осадок – четырехкомпонентная (твердая, жидкая, газообразная и биотическая), термодинамически неустойчивая природная система, изменение одной составляющей в которой ведет к кардинальной перестройке всего объекта».

Соответственно, данный показатель должен включать в себя математическое выраженное изменение соотношения компонент на всем отрезке образования осадка от взвеси до донного грунта (горной породы). В нашем случае этими компонентами должны выступать жидкая и биотическая составляющие. Если биотическая компонента вполне определена, то жидкую компоненту целесообразно разделить на две составляющие: общее (суммарное) содержание воды в осадке, и то количество воды, которое непосредственно участвует в физико-химических реакциях с твердой фазой и придаёт глинистому грунту фундаментальное свойство – пластичность. В общем виде индекс трансформации осадка выступает неким формализованным выражением процесса седиментации и раннего диагенеза.

В связи с этим для определения индекса трансформации были выбраны показатели состава *первого порядка*, определяемые одним прямым методом: естественная влажность осадка (W_e), влажность на границе текучести (W_L) и относительное содержание органического вещества ($C_{орг}$). Влажность на границе текучести выбрана как одна из «критических точек» состояния осадка, в которой силы сцепления (c) и угол внутреннего трения (μ) стремятся к 0, что характерно для перехода любого глинистого вещества из пластичного состояния в текучее.

Итак, индекс трансформации осадка можно записать в следующем виде:

$$I_{mo} = \frac{W_L - W_e}{C_{орг}^2},$$

где I_{mo} – индекс трансформации осадка, W_L – влажность на границе текучести, %, W_e – естественная влажность осадка, %, $C_{орг}$ – относительное содержание органического вещества, %.

При использовании данного коэффициента все множество состояний донного грунта разбивается на интервалы значений от $-n$ до $+n$ с переходом через 0. Отрицательные значения I_{mo} относятся к области осадка (ила), положительные I_{mo} к области породы (пластичных глин).

Анализ свойств морских органо-минеральных грунтов Белого, Лаптевых, Азовского и Черного морей следует, что граница раздела в системе «ил–глина» при пороговых значениях $W_e = W_L$ и $C_{орг} \approx 3\%$ по вышеприведенному индексу может находиться на разной глубине. Числовые значения основных физико-химических параметров (W_e , W_L и $C_{орг}$) в системе «наил – осадок» («осадочный туман») могут быть различны, и зависеть от конкретных геолого-геоморфологических условий седиментации определенной природно-климатической зоны.

Таким образом, исходя из показателей физико-химических свойств природных глинистых грунтов представляется целесообразным стадийность формирования глинистых пород представить в следующем виде: седиментогенез – диагенез – литогенез – катагенез, без разбивки термина «диагенез» на «ранний и поздний». Границу седиментогенез – диагенез определить по $W_e \geq W_L$ и $C_{орг} \geq 3\%$.

Постседиментационные процессы преобразования органических, органо-минеральных и глинистых грунтов были исследованы на отдельном геоморфологическом объекте, ватте (лайде – поморское), приурезовой травянистой равнине, расположенной на южной оконечности о. Средний. Участок представляет собой обширное долинообразное понижение, заполненное моренными отложениями и находящееся между двумя блоками, сложенными скальными породами (останцами). Территория, на которой проводились исследования, в настоящее время представляет собой ватт, полностью вышедший на земную поверхность в процессе неотектонического поднятия и геоморфологически расположенный от уреза воды до первой береговой террасы. В послеледниковое время эта территория представляла собой сначала узкий, шириной 70-100 м, пролив, а затем губу, в которой на относительно небольшой глубине 10-20 м происходило накопление тонких осадков, минеральных (глинистых) и органо-минеральных (илов) грунтов. В настоящее время в максимальный (сизигийный) прилив вода проникает только в отдельные понижения ватта (литоральные ванны), соединенные с морем каналами стока, т. е. извилистыми мелководными временными водотоками.

Весь вскрытый разрез четвертичных отложений (до 2,9 м) представляет собой секвенцию двух горизонтально залегающих толщ отложений двух фациально-генетических типов – лагунных (Q^4_{mlag}) и бухтовых (Q^4_m).

Лагунные отложения сформировались в существенно земноводной обстановке, в режиме знакопеременных условий осушения-обводнения. Они практически идентичны отложениям приливной равнины о. Бол. Горелый. Литологически это один горизонт, представленный супесями и суглинками, подразделяемый на инженерно-геологические элементы (ИГЭ) только по гранулометрическому составу и характеристикам физико-механических свойств грунтов. ИГЭ-1 – супесь песчаная коричневато-бурая, болотно-оливковая, в верхней части гумусированная с корневищами растений, пластичная. Внизу горизонта супесь неслоистая, бесструктурная, комковатая, местами ожелезненная с включениями полуокатанных глыб, валунов и щебня до 30%. Мощность варьируется от 15 до 70 см. Влажность (W_e) – 25%, плотность (ρ) – 1,88 г/см³. ИГЭ-2 – суглинок серый до темно-серого и болотно-оливкового, однородный, неслоистый, тугопластичный, имеет комковатую текстуру, нечетко выраженную горизонтальную сланцеватость, которая с глубиной исчезает. Присутствуют включения редкого гравия и мелкого щебня, линзы буровато-коричневого среднего песка. В

нижней части горизонта встречаются единичные обломки раковин моллюсков разной степени сохранности. Мощность до 30 см. Влажность (We) – 31%, плотность (ρ) – 1,91 г/см³, сцепление (c) – 0,16 кгс/см², угол внутреннего трения (ϕ) – 14°. ИГЭ-3 – суглинок светло-серый, однородный, неслоистый, мягкопластичный, горизонтальная сланцеватость отсутствует. Наблюдается примазка гидротроилита. В нижней части горизонта суглинок гравелистый сизовато-сероватый с темно-оливковым оттенком со щебнем, дресвой, гравием и плохоокатанной галькой. Мощность до 20 см. Контакт с нижележащими отложениями четкий с литологическим несогласием. $We = 29\%$, $\rho = 1,70$ г/см³, $c = 0,14$ кгс/см², $\phi = 11^\circ$

Бухтовые отложения залегают с литологическим несогласием под лагунными, граница четкая и ровная. Они представлены достаточно мощной и выдержанной по простиранию толщей глинисто-суглинистых грунтов. Эти отложения по своему гранулометрическому и минеральному составу, а также физико-механическим характеристикам резко отличаются от вышележащих лагунных и, можно с уверенностью сказать, являются прямым аналогом современных бухтовых грунтов губы Никольская. ИГЭ-4 – глина голубовато-серая, однородная с редкими включениями линз темно-серого мелкого песка и тонкими прослоями (до 0,5 мм) гидротроилита, мягкопластичная. Залегает в виде изометрического тела в центральной части ватта в интервале 1,2...1,6 м. $We = 44\%$, $\rho = 1,78$ г/см³, $c = 0,19$ кгс/см², $\phi = 9^\circ$. ИГЭ-5 – глина голубовато-серая, однородная с включениями единичного гравия и хорошо окатанной галькой (до 2 см) и створками морских двустворчатых моллюсков высокой степени сохранности (*Mytilus edulis L.*), хорошо сортированная, текучепластичная. Характерно наличие пылеватых частиц пирита и слюды. Вскрытая мощность более 2,5 м. $We = 55\%$, $\rho = 1,70$ г/см³, $c = 0,11$ кгс/см², $\phi = 8^\circ$. В качестве самостоятельного инженерно-геологического элемента (ИГЭ-6) выделяется суглинок темно-серый с неясной слоистостью мягко-пластичный, залегающий в виде линзы мощность 15-20 см в южной части ватта в массиве бухтовых глин. Суглинок имеет комковатую текстуру, содержит единичные включения хорошо окатанной или полуокатанной гальки, линзовидные горизонтальные прослои и гнезда, обогащенные песком, а также черными примазками гидротроилита. $We = 26\%$, $\rho = 1,97$ г/см³, $c = 0,13$ кгс/см², $\phi = 10^\circ$. Содержание органического вещества в изученных грунтах ватта небольшое и не превышает 3%, гигроскопическая влажность также незначительная, не более 1,5%.

Рассматривая состав, строение и физико-механические свойства грунтов, слагающих приливную равнину, следует отметить несколько принципиальных моментов, характеризующих эти отложения по гранулометрическому составу и физико-механическим свойствам:

1. Лагунные и бухтовые отложения по гранулометрическому составу и физико-механическим характеристикам резко отличаются друг от друга;

2. Погребенные бухтовые глинистые отложения острова Среднего по условиям формирования являются прямым аналогом современных морских органо-минеральных грунтов бухты Никольской.

Итак, при сравнении гранулометрических составов современных бухтовых органо-минеральных грунтов губы Никольской и бухтовых отложений приливной равнины острова Среднего, вышедших на дневную поверхность, следует отметить прямую унаследованность первых по отношению ко вторым.

И в первом, и во втором случае в гранулометрическом составе отложений отмечается полное доминирование фракций менее 0,25 мм, на которые приходится более 95% суммы фракций. Кроме этого, в обоих случаях содержание фракции 0,05-0,01 мм варьируется в диапазоне 20-30% (максимальное содержание отмечено в сезон 2010 г. – 52%).

Непостоянство вниз по разрезу, как гранулометрического состава, так и физико-химических свойств отмечается даже в самих текучих глинах о. Среднего (табл. 9). Так с глубиной (с 76 до 160 см) возрастает содержание фракций 0,01-0,002 и > 0,002 мм с 31,3 до 43% и 10,6 до 15,8% соответственно, с одновременным уменьшением фракций 0,1-0,05 и 0,1-0,05 мм (10,8 → 7,1% и 40,8 → 28,8%). Все эти вариации гранулометрического состава

связаны исключительно с условиями первичного формирования осадка. Вычленив диагенетическую составляющую в изменении гранулометрического состава не представляется возможным, хотя ее наличие никаких сомнений не вызывает. Можно только предполагать, что это явление, вероятно, присутствует в изменении соотношения фракций 0,01-0,05 и 0,01-0,002 мм. Вполне возможно, что уменьшение содержания фракции 0,01-0,05 и зеркальное увеличение фракции 0,01-0,002 связано с разрушением микроагрегатов, связанных между собой органическим веществом в процессе раннего диагенеза.

Важнейшая гранулометрическая фракция, отвечающая за все физико-химические свойства грунтов ($>0,002$ мм), в грунтах приливной равнины о. Среднего и в органо-минеральных илах бухты Никольской стабильна и составляет величину около 15%.

Необходимо отметить, что изменения гранулометрического состава можно объяснить несколькими причинами:

1. Ил глинистый – крайне нестабильное локально-фациальное образование, вариации состава и свойств которого зависят от множества конкретных геолого-географических факторов. В каждой конкретной точке шельфа одни факторы осадкообразования могут превалировать над другими, поэтому их суммарное направление и действие носят непостоянный характер. В пользу этого говорят существенные вариации гранулометрического состава и физико-химических свойств илов в одной конкретной точке D постоянного мониторинга грунтов в губе Никольской.

2. Сам процесс формирования и осаждения органо-минеральной взвеси в бассейне седиментации, а также последующие трансформации в грунтовой толще зависят от многочисленных трудно прогнозируемых изменений гидродинамических, физических и химических параметров водной среды. В данном случае, по всей видимости, в процессе биоседиментации отдельные минеральные частицы оседают на дно не в виде отдельных грунтовых элементов (фракции $< 0,002$ мм), а в виде микроагрегатов размером 0,05-0,01 и, возможно, частично 0,1-0,05 мм, соединенных между собой органическим веществом. Органическое вещество, после достижения порогового значения содержания в 3%, разлагается; нестойкие микроагрегаты распадаются на элементарные грунтовые частицы.

3. Источники питания бассейна седиментации осадочным веществом на обоих рассматриваемых объектах были одинаковыми: размыв четвертичных отложений предыдущих периодов, твердый сток рек, абразия клифов побережья. Однако они отличались как по вкладу каждого в общую картину седиментации, так и по мощности воздействия, что могло сказаться на распределении фракций в общем гранулометрическом составе грунтов.

Физико-химические свойства современных морских органо-минеральных грунтов, прошедших первичные стадии дегидратации и уплотнения, вышедших на дневную поверхность и эволюционировавших в бухтовые отложения приливной равнины, претерпели разительные изменения.

Изменения в показателях физико-химических свойств грунтов отмечаются непосредственно в разрезе текучих бухтовых глин на самой приливной равнине: возрастают I_p , ρ и ρ_s . Кажущееся противоречие в увеличении с глубиной разреза We и n легко объясняется постоянным водонасыщением нижних горизонтов глинистых отложений вследствие постоянных приливных явлений по сравнению с верхним горизонтом, который большую часть времени находится в субаэральных условиях. В среднем We составляет 60%, $I_p=23$, а $n=50-50\%$ при $c = 1,72$ г/см³ и $C_{орг}$ около 2%.

Сопоставляя значения физико-химических показателей I порядка (We , I_p , n , c , $C_{орг}$) илов губы Никольской с текучими бухтовыми глинистыми отложениями о. Среднего, можно сделать следующие выводы. Физические свойства грунта претерпели разительные изменения: естественная влажность упала со 150 до 48 % (в 3 раза), пористость с 80 до 60%

Таблица 9

Показатели гранулометрического состава и физико-химических свойств грунтов губы Никольской и вагга о. Среднего

Глубина отбора, см.	We, %	W _L , %	W _p , %	W _z , %	I _p	I _L	ρ, г/см ³	ρ _s , г/см ³	n, %	e	C _{орг} , %	Гранулометрический состав, в % к весу						
												1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
Глина о. Средний	55	58	35	3,1	23	0,87	1,70	2,77	60	1,53	1,8		1,4	3,9	7,1	28,8	43,0	15,8
Ил 2002 г.	96	95	70	1,4	25	1,00	1,41	2,66	73	2,70	4,8	2,1	6,0	10,7	30,8	26,7	15,4	8,3
Ил 2004 г.	140	120	91	1,6	29	1,65	1,35	2,68	79	3,76	3,0	1,9	3,8	7,3	23,1	33,1	13,1	17,7
Ил 2010 г.	149	127	89	1,5	38	1,58	1,34	2,67	80	3,98	3,3	0,1	0,7	4,2	8,5	51,6	23,5	11,6

Таблица 10

Показатели гранулометрического состава и физических свойств морских глин приливной равнины о. Среднего

Глубина отбора, см.	We, %	W _L , %	W _p , %	W _z , %	I _p	I _L	ρ, г/см ³	ρ _s , г/см ³	n, %	e	C _{орг} , %	Гранулометрический состав, в % к весу						
												1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
76-81	42	48	21	1,4	17	1,00	2,75	1,71	52	1,10	2,3	0,1	0,1	6,3	10,8	40,8	31,3	10,6
130-135	56	58	34	1,6	23	1,65	2,77	1,70	61	1,52	2,2			1,5	6,7	33,8	44,0	14,0
155-160	57	60	37	1,5	23	1,58	2,78	1,73	60	1,50	1,3		1,4	3,9	7,1	28,8	43,0	15,8

(в 1,3 раза), число пластичности с 38 до 23, плотность грунта увеличилась с 1,34 до 1,71 г/см³ (в 1,27 раза), а плотность частиц грунта с 2,67 до 2,77 г/см³. Содержание $C_{орг}$, основного классификационного грунтоведческого показателя при разделении минеральных и органо-минеральных грунтов, при этом снизилось с 3 до 1,8 %.

Проведенное исследование фазового состава показало, что в целом пробы имеют сходный минеральный состав, представленный полиминеральной смесью, основными компонентами которой являются иллит, хлорит, кварц и полевой шпат существенно плагиоклазового состава. В качестве постоянной примеси было отмечено присутствие амфибола, гетита, в большинстве проб наличие неупорядоченных смешано-слоистых образований типа иллит-сметит с содержанием набухающей составляющей до 10-15%. Сравнивая минеральный состав грунтов современных донных грунтов бухты Никольской с глинистыми грунтами приливной равнины, вышедшими на дневную поверхность, следует отметить ряд интересных особенностей, связанных как с самим набором минералов в грунте, так и с составом глинистых минералов, а также с количественным соотношением групп между собой. Во-первых, с глубиной инженерно-геологического разреза уменьшается содержание как самого смектита, так и неупорядоченной фазы иллит-сметит; во-вторых, существенно уменьшается содержание иллита с 57 до 48%; в-третьих, отмечается увеличение количества кварца с глубиной инженерно-геологического разреза с 22 до 31%. Изменения в составе глинистых минералов связаны с диагенетическими процессами в грунтовой толще: дегидратация осадка, его уплотнение, изменение химического состава поровых вод и, как следствие, упорядочивание в результате ионно-обменных реакций структуры глинистых минералов, т. е. *низкотемпературный трансформационный диагенез*.

Резюмируя особенности минералогического строения бухтовых грунтов, вышедших в процессе неотектонического поднятия на сушу, прежде всего, необходимо отметить, что минералогически они практически идентичны современным органо-минеральным илам. По данным рентгенофазового анализа в них присутствует практически одинаковый набор минералов: кварц, полевой шпат, амфибол, биотит. Основное отличие касается степени кристаллизации глинистых минералов. Трансформационные изменения коснулись системы «иллит-сметит».

Подводя итог анализу и сопоставлению существующих в настоящее время схем образования илов с точки зрения грунтоведения, необходимо подчеркнуть в целом единый подход при формировании предложенных гипотез, которые основываются на результатах определений показателей физико-механических свойств с привлечением соответствующих теоретических основ коллоидной и физической химии.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что кажущиеся противоречия и нестыковки на данном этапе изучения проблем седиментации объясняются, возможно, следующими причинами:

1. Океанический диагенез существенно отличается от осадконакопления на шельфе как глубоководном, так и прибрежном. При океаническом седиментогенезе основную роль играют физико-химические процессы структурообразования осадка. Биологические факторы имеют существенно подчиненную роль.

2. Благодаря уникальности осадкообразования в губах Белого моря удалось построить модель формирования осадка в присутствии органического вещества. Для прибрежно-морских органо-минеральных грунтов основным фактором при их образовании является биоседиментация, триггером которого является органическое вещество.

3. По мере удаления от берега «амбивалентность» биоседиментации и физико-химического структурообразования в донных осадках возрастает и на внешнем шельфе, весьма вероятно, эти процессы стремятся к некому равновесию, возможно, при $C_{орг} \approx 2-3\%$.

4. Описанные стадии формирования морских органо-минеральных грунтов выделяются в ряде регионов шельфа морей северной Евразии, что говорит об универсальном характере изучаемого процесса осадкообразования.

Рассматривая в целом иерархическое соотношение неорганических и органических компонент в грунте, можно прийти к заключению о глубокой взаимосвязи между ними: каждому линейному размеру элемента грунта (горной породы), как правило, соответствует свое состояние живого и неживого вещества, контролируемое пространственным расположением (геометрия порового пространства). Таблица «организации» глинистых грунтов составлена с учетом геометрии порового пространства и типа микростроения грунтов (по В.Н. Соколову). Продолжая цепочку логических построений дальше и выходя за рамки тематики морских органо-минеральных грунтов, можно в самом общем виде ранжировать все биокосные объекты по их уровню организации:

1. Растворенное органическое вещество (фрагменты белков, жиров, углеводов) – атомы и простые органические молекулы в поровом растворе. Присутствие в нем же и во внешнем диффузном слое глинистой частицы. Ионно-обменные реакции с их участием, появление мостиков между глинистыми частицами.

2. Биополимеры. Органо-минеральные коллоиды. Поверхностно-активные органические вещества – сложные органические соединения, находящиеся на границе 1 и 2 слоев в двойном электрическом слое. Гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК).

3. Органо-минеральные соединения. В аквальных условиях процессы адсорбции, в основном, на базальные поверхности глинистых частиц. Этим определяется пластичность грунта. В субаэральных условиях – ФК и ГК. Процессы почвообразования и генерация гумуса.

4. Ил, сапрпель, филолит, торф, угли.

5. Биокосное вещество (минералоорганические соединения) – эмаль зубов, костная ткань.

Глава 6. Классификации органо-минеральных грунтов

Проведённые исследования морских органо-минеральных грунтов различных регионов шельфа морей России позволили предложить новые определения терминов «ил» и «сапрпель» и логически и грунтоведчески выверенные частные классификации органо-минеральных грунтов: илов, сапрпелей, заторфованных грунтов.

Ил – современный аквальный (морской и пресноводный) грунт, $I_r \geq 3\%$, $We > W_L$.

По относительному содержанию органического вещества I_r грунты подразделяют виды в соответствии с таблицей 12.

Таблица 12

Вид грунтов	Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.
Минеральные	$I_r \leq 0,03$
Органо-минеральные	$0,03 < I_r < 0,50$
Органические	$I_r \geq 0,50$

По относительному содержанию органического вещества I_r органо-минеральные грунты подразделяют на разновидности в соответствии с таблицей 13.

Таблица 13

Разновидность (подвид) грунтов	Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.
- с примесью органического вещества	$0,03 < I_r \leq 0,10$
- с низким содержанием органического вещества	$0,10 < I_r \leq 0,30$
- с высоким содержанием органического вещества	$0,30 < I_r < 0,50$

По относительному содержанию органического вещества I_r илы подразделяют согласно таблице 14.

Таблица 14

Разновидность илов	Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.
Высокоминеральный	$0,03 < I_r \leq 0,07$
Среднеминеральный	$0,07 < I_r \leq 0,10$
Низкоминеральный	$I_r > 0,10$

По относительному содержанию органического вещества I_r сапропели подразделяют согласно таблице 15.

Таблица 15

Разновидность сапропелей	Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.
Высокоминеральный	$0,10 < I_r \leq 0,30$
Среднеминеральный	$0,30 < I_r \leq 0,50$
Низкоминеральный	$I_r > 0,50$

По относительному содержанию торфа грунты подразделяют согласно таблице 16

Таблица 16

Торфосодержащий грунт	Относительное содержание органического вещества I_r , д.е.	
	пески	глинистые грунты
С примесью торфа	$0,03 \leq I_r$	$0,05 < I_r \leq 0,10$
Заторфованные	$0,10 < I_r \leq 0,25$	
Торфянистые	$0,25 < I_r \leq 0,50$	
Торф	$I_r \geq 0,50$	

Исходя из высказанных ранее соображений физико-химические и биологические параметры грунта, с учетом контактных взаимодействий можно представить в виде сводной таблицы (табл. 17).

Заключение – ил как категория грунта

Ил – полиминеральная трехфазная, четырехкомпонентная термодинамически неустойчивая грунтовая система, находящаяся в самом начале своего образования.

В геологическом смысле, ил – это современные слабосвязанные неуплотненные сильноувлажненные глинистые образования, осадки, занимающие начальное место в ряду эволюции глинистых пород: илы – слабоуплотненные глины – уплотненные глины – аргиллиты.

В грунтоведческом понимании, ил – это дисперсный связный органо-минеральный грунт, представляющий собой образовавшийся в водной среде при участии биохимических процессов структурированный осадок, естественная влажность которого превышает влажность верхнего предела пластичности.

Илы – наиболее распространенный тип донных осадков акваторий морей и океанов, ими покрыты значительные площади на шельфе, на континентальном склоне и в глубоководных впадинах. Илы выявлены в акваториях всех морей России.

Гранулометрический состав илов непостоянен. Как правило, в его составе доминируют глинистые и тонкопылеватые фракции, суммарный состав которых может составлять > 50-70%. Гранулометрический состав донных грунтов зависит от глубины бассейна седиментации, расстояния от источника питания осадочным материалом, гидродинамического режима акватории. Все эти факторы вместе или каждый по отдельности определяют гранулометрический состав.

Минеральный состав твердых частиц илов характеризуется двухкомпонентным составом (минералы обломочной и глинистой фракций). Минералы обломочной фракции представлены кварцем, полевыми шпатами, амфиболами, роговой обманкой и др. остоянной фазой минерального состава также является кремнезем – фрагменты радиолярий и кремнистых диатомей. Состав обломочной фракции определяется, в основном, типом пород

питающих провинций. В минеральном составе глинистой фракции ($< 0,001$ мм) шельфовых илов изученных морей присутствуют гидрослюда, каолинит, монтмориллонит, смешанослойные образования – смектит. Полиминеральный состав глинистых минералов илов обусловлен типом пород и направленностью процессов выветривания в области сноса, а также физико-химическими условиями постседиментационных диагенетических процессов в иловой толще

Органическая компонента илов – важнейшая компонента грунта, определяющая все физико-химические свойства – имеет различное происхождение. Выделяется терригенное органическое вещество, поступившее в бассейн седиментации с твердым стоком, и биогенное органическое вещество – растворенное органическое вещество (остатки фито- и зоопланктона и фито- и зообентоса), попавшее в осадок в процессе биологического круговорота органического вещества из окружающей гидросферы. Соотношение первой и второй группы различно в зависимости от биологической продуктивности бассейна седиментации, удаленности берега и устьев крупных рек, впадающих в водоем. По доминированию какой-либо группы выделяют илы с терригенным органическим веществом ($>50\%$), биогенным ($<50\%$) и смешанным ($50\approx 50\%$). Содержание $C_{орг}$ в илах всегда более 3% , в отдельных случаях, в особых физико-географических зонах, $C_{орг}$ может превышать 10% . Максимальное количество $C_{орг}$ находится в придонном осадочном тумане (наилке) и с увеличением глубины залегания илов уменьшается. Кроме того, в морских илах присутствуют карбонаты, содержание которых различно в различных морях.

Постоянной компонентой морских органо-минеральных грунтов является *газовая* составляющая. Максимально ее проявление заметно в верхних интервалах иловой толщи. Газ азотный, азотно-метановый и метаново-азотный, с заметным количеством углекислого газа целиком биохимического происхождения. Морская вода имеет щелочную реакцию (рН 7,8-8,3), которая зависит от количества углекислоты; с уменьшением ее содержания реакция среды становится более щелочной.

Физико-химические свойства илов. Следует отметить, что значения естественной влажности, влажности на верхнем пределе пластичности, показателе текучести и консистенции илов являются максимальными из всех типов, видов и разновидностей грунтов ($We > 250\%$, $Ip > 25$, $I_L > 1$), значения же плотности, наоборот, невелики и составляют 1,2-1,6 г/см³. Значительные вариации данных показателей связаны с разнообразием илов по минералогическому и гранулометрическому составу, содержанию органических веществ, типам контактов и типам микростроения. Естественная влажность илов возрастает с увеличением их дисперсности, а также содержания органических веществ.

Абсолютно все илы имеют дальние *коагуляционные контакты* и *ячеистый тип микростроения*. Именно типы микростроения и контактов определяют специфические физико-химические и физико-механические свойства морских органо-минеральных грунтов. Илы шельфа характеризуются слабощелочными условиями образования – рН 7,2-7,9. Наличие слабого электролита способствует коагуляции тонкодисперсных частиц уже в ходе осадконакопления. Об изменении физико-химических свойств по латерали можно говорить применительно к определенному бассейну седиментации (море). Ил – локально-фациальное геологическое образование, состав, строение и свойства которого полностью зависят от конкретной физико-географической обстановки.

Основными причинами изменчивости свойств илов являются различные условия их формирования: 1. Характер (состав первичного материала и скорость поступления взвеси) терригенного стока с сопредельной суши; 2. Гидродинамический режим акватории; 3. Удаленность от берега и глубина моря; 4. Направленность и динамика последующих эпигенетических преобразований; 5. Биологическая продуктивность водоема.

С глубиной инженерно-геологического разреза физико-химические свойства илов изменяются: влажность, как правило, уменьшается, а плотность увеличивается. Это связано с диагенетическими изменениями в грунтовой толще. Данный процесс выражается не только в

Таблица 17

Физико-химические и биологические параметры глинистого грунта

Размер (m)	Частицы	Органическое вещество грунта		Состояние	Геометрия порового пространства	Тип микростроения						
		неживое	живое			Чистый	Тип контактов					
10^{-10} (А)	Атомы Отдельные молекулы	Атомы Отдельные молекулы Биополимеры - полисахариды - протеин - лигнин - липиды	Почвенные микроорганизмы - бактерии - грибы Почвенная микрофауна - простейшие - нематоды	Органо-минеральные коллоиды Квазикристаллы Домены Ассоциации	Ультромикропоры Микропоры Адсорбционная и кристаллизационная вода	Чистый	Ламинарный					
10^{-8}	Аморфные минералы							Почвенная фауна - клещи - муравьи - черви	Микроагрегаты	Свободная вода (зона аэрации)	Смешанный	Переходные
10^{-7}	Глина											
10^{-6} (mm)	Пыль	Микробиота, клеточные остатки	Корни растений	Травяная растительность	Грунт/Почва	Смешанный	Ламинарный					
10^{-5}								Гравий	Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Переходные	
10^{-4}	Песок	Гравий	Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Свободная вода (зона аэрации)	Смешанный	Переходные					
10^{-3} (mm)								Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Свободная вода (зона аэрации)	Переходные	
10^{-2}	Гравий	Горная порода	Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Свободная вода (зона аэрации)	Смешанный	Ламинарный					
10^{-1}								Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Свободная вода (зона аэрации)	Переходные	
10^0 (m)	Горная порода	Горная порода	Горная порода	Свободная вода (зона аэрации)	Свободная вода (зона аэрации)	Смешанный	Ламинарный					

изменении показателей физико-химических свойств илов, но и в определенной трансформации в структуре глинистых минералов, слагающих минеральную компоненту грунта. В основном происходят трансформационные изменения в системе «гидрослюда – смешанослойные монтмориллонитового типа» и «гидрослюда – монтмориллонит», в сторону лучшей окристаллизованности гидрослюда и общего увеличения смешанослойных минералов, происходящих в грунтовой толще на ранних стадиях седиментогенеза.

Процесс формирования состава, строения и свойств морских органо-минеральных грунтов происходит в трех взаимосвязанных средах, характеризующимися своими определенными специфическими особенностями. 1. Гидросфера – взвесь; 2. Осадок – барьерная зона «гидросфера-литосфера»; 3. Грунт – литосфера.

Рассматривая формирование илов как единый непрерывный геологический процесс, с точки зрения физико-химической механики дисперсных природных сред в нем можно выделить ряд стадий, отличающихся своими уникальными физико-химическими характеристиками. Весь процесс формирования морских органо-минеральных грунтов (илов) разбит на 9 стадий, три из которых относятся к гидросфере, пять – к осадку и одна – к породе.

ПУБЛИКАЦИИ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНО ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи и публикации в журналах по перечню ВАК России

1. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г. Инженерно-геологические свойства илов залива Анива Охотского моря. Вестник СПбГУ, сер. 7, Вып. 3, 1994. с. 90-92.
2. Здобин Д.Ю. Инженерно-геологическое строение и физико-механические свойства илов северной части Охотского моря. Тихоокеанская геология, 1995, т.14, № 2, 26-31.
3. Здобин Д.Ю., Лаздовская М.А. Физико-механические и биохимические свойства шельфовых илов Охотского моря. М., Бюл. МОИП, отдел геологический, т. 1, Вып. 75, 2000, с. 59-61.
4. Здобин Д.Ю., Абакумов Е.В., Шешукова А.А., Зуев В.С. Характеристика органического вещества прибрежно-морских грунтов Кандалакшского залива Белого моря. Вестник СПбГУ, Сер. 7, Вып. 3. 2007, с. 25-31.
5. Здобин Д.Ю. О классификации органо-минеральных грунтов. 12 Сергеевские чтения, Москва, 2010, с. 323-326.
6. Здобин Д.Ю., Семенова Л.К. О гранулометрическом анализе грунтов: классические и лазерные методы. Геоэкология № 6, 2011, с. 560-567.
7. Здобин Д.Ю. О новом виде органических грунтов. 14 Сергеевские чтения. М., 2012, с. 30-36.
8. Здобин Д.Ю. Новый вид дисперсных связных органических грунтов – морской фитолит. Вестник СПбГУ, 2013, Сер. 7. Вып. 1. С. 42-48.
9. Здобин Д.Ю. Стадийность образования глинистых грунтов в присутствии органического вещества. Геоэкология, 2013, №3, с. 259-263.
10. Здобин Д.Ю., Семенова Л.К. Показатели текучести и консистенции – основные физико-химические характеристики состояния грунтов. Инженерные изыскания, 2013, № 5, с. 28-32.
11. Здобин Д.Ю. Состав и свойства илов шельфа Охотского моря. Инженерная геология, № 2, 2014, с. 34-44.
12. Здобин Д.Ю., Бахматова К.А., Матинян Н.Н., Свертилов А.А., Гостинцева Е.В., Семенова Л.К., Соколова Ю.Ю. Новый метод определения содержания органического вещества в грунтах. Грунтоведение, 2014, № 2, с. 14-25.
13. Здобин Д.Ю., Бахматова К.А., Матинян Н.Н., Свертилов А.А., Гостинцева Е.В., Семенова Л.К., Соколова Ю.Ю. Методы лабораторного определения содержания органических веществ в грунтах. Инженерная геология, 2015, № 1, с. 26-36.
14. Здобин Д.Ю. О консистенции грунтов естественного сложения. 17 Сергеевские чтения, М., 2015, с. 554-561.
15. Здобин Д.Ю. Естественная прочность и деформируемость глинистых грунтов. Часть 1. Инженерная геология, 2015, № 3, с. 12-21.

16. Здобин Д.Ю. Естественная прочность и деформируемость глинистых грунтов. Часть 2. Инженерная геология, 2015, № 4, с. 30-35.
17. Осипов В.И., Здобин Д.Ю., Соколов В.Н, Иванов М.В. Особенности формирования микростроения илов Белого моря на стадии седиментогенеза. Геозкология, 2015, № 6, с. 574-582.
18. Здобин Д.Ю. Вержбицкий В.Е., Худолей А.К., Тучкова М.И., Рогов М.А. Состав и свойства илов шельфа моря Лаптевых. Инженерная геология, № 5, 2015, с. 44-52.

**Избранные статьи в неперидических изданиях, сборниках,
материалах конференций и тезисах докладов**

19. Здобин Д.Ю. Инженерно-геологические свойства илов шельфа западной части залива Терпения. Сб. научных трудов «Морская инженерная геология», Рига, ВНИИМоргео, 1990, с. 53-60.
20. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г. Особенности формирования инженерно-геологических свойств донных грунтов халистаз Охотского моря. Проблемы инженерной геологии, СПб, СПбГИ, с. 24-25, 1997.
21. Здобин Д.Ю., Пупков О.М. Тектоника и стратиграфия шельфа северной части Охотского моря. ICAM III. Abstract, Celle, 1998.
22. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г., Баранова Н.А. Минералогический состав современных донных отложений Белого моря. Материалы международного симпозиума «Минералогические музеи». С.-Петербург, СПбГУ, с. 49, 1998.
23. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г., Усов В.А. Глинистые минералы ваттовых отложений Белого моря как индикаторы биогенного механизма диагенеза. Тез. доклада на IX съезде Минералогического общества при РАН «Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века», СПб, 1999, с 69.
24. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г., Гойло Э.А., Сапега В.Ф. Рентгеновское изучение шельфовых илов Охотского моря. Тез. доклада XIV международное совещание «Рентгенография минералов», СПб, СПбГУ, 1999, с. 218.
25. Здобин Д.Ю., Зайончек В.Г., Сапега В.Ф., Фатеев А.Э. Образование новой минеральной ассоциации при питании полихеты *Arenicola marina*. Тез. доклада III международного семинара «Минералогия и жизнь: биоминеральные гомологии», Сыктывкар, 2000, с. 37-38.
26. Здобин Д.Ю. Физико-химические и биохимические свойства прибрежно-морских органо-минеральных осадков. Тез. доклада II международного симпозиума «Биокосные взаимодействия: Жизнь и камень», СПб., СПбГУ, 2004, с.113-117.
27. Здобин Д.Ю., Стогов И.А., Мовчан Е.В. Биоседиментация в пресноводных наскальных ваннах. Тез. доклада II международного симпозиума «Биокосные взаимодействия: Жизнь и камень», СПб., СПбГУ, 2004, с. 117-120.
28. Здобин Д.Ю. Классификация органо-минеральных грунтов. Тез. доклада II российского совещания по органической минералогии. Петрозаводск, 2005, с. 125-129.
29. Здобин Д.Ю., Иванов М.В. Биоседиментация на плантациях марикультуры *Mytilus edulis* L. на Белом море. «Биокосные взаимодействия. Жизнь и камень». Тезисы доклада III международного симпозиума. СПб, 2007, с. 24-28.
30. Здобин Д. Ю., Абакумов Е.В. Характеристика органического вещества прибрежно-морских органо-минеральных грунтов. «Минералогия и жизнь» Тезисы доклада IV международного семинара, Сыктывкар, 2007, с. 43-44.
31. Здобин Д.Ю. Процесс образования глинистых грунтов в присутствии органического вещества. В сб. «Типы седиментогенеза и литогенеза их эволюция в истории Земли». Труды V Всероссийского литологического совещания. Екатеринбург, 2008, с. 241-242.
32. Zdobin D.Yu., N. Kuten. The process of clay soil formation in the presence of organic substance. 33 International geological congresses, Oslo, 2008. p. 279.
33. Здобин Д.Ю., Табунс Э.В., Кукса Е.А. Галогены как геохимические индикаторы ранних стадий седиментогенеза глинистых осадков в присутствии органического вещества. Труды

- XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М., Геос, 2009, т. IV, с. 77-82.
34. Здобин Д.Ю. Минеральный состав современных отложений бухт заливов моря Лаптевых. «Концептуальные проблемы литологических исследований в России». Материалы VI Всероссийского литологического совещания. Казань, 2011, с.314-317.
35. Здобин Д.Ю. Состав и физико-химические свойства илов губ Кандалакшского залива Белого моря. Труды XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, М., Геос, 2011, т. III, с. 156-162.
36. Здобин Д.Ю. Физико-химические свойства отложений латеральных лагун Кандалакшского залива Белого моря. Труды XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, М., Геос, 2011, т. III, с. 162-167.
37. Здобин Д.Ю., Иванов М.В. Особенности биоседиментации на плантациях марикультуры *Mytilus Edulis* на Белом море. Труды XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, М., Геос, 2011, т. III, с. 167-170. (совместно с М.В.Ивановым).
38. Здобин Д.Ю. Прибрежно-морской литогенез бухт заливов моря Лаптевых. Материалы Всероссийского литологического совещания «Ленинградская школа литологии». СПб, 2012, т. I, с. 112-114.
39. Здобин Д.Ю. Минералогия и микростроение шельфовых илов Охотского моря. Труды XX Международной научной конференции (Школы) по Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М., Геос, 2013, т. II. с. 267-272.
40. Здобин Д.Ю. Современное положение грунтоведения. 16 Сергеевские чтения. М., 2014, с. 33-35.
41. Здобин Д.Ю. О возможном универсальном показателе трансформации осадка. Труды XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, М., Геос, 2015, т. III, с. 37-42.
42. Здобин Д.Ю. Градация системы «ил глинистый – глина текучая» по соотношению фаз донного грунта: универсальный показатель трансформации осадка. Грунтоведение, 2016, № 1, с. 9-16.
43. Zdobin D. Yu. The physic-mechanical properties of the silts from the northern part of Okhotsk Sea. ICAM II. Abstract, Magadan, 1994.
44. Zdobin D. Yu. Geotechnical prospecting at the Okhotsk sea shelf, Russian Far East. Abstract, 8 IAEG congresses Vancouver, 1998.
45. D. Zdobin, N. Kuten, The process of clay soil formation in the presence of organic substance, 33 International geological congresses, Oslo.
46. Zdobin D.Yu. Methodology of resent bottoms pretreatment for XRD analysis. . International conference Clay, clay minerals and layered materials, Zvenigorod, 2009, p. 69.
47. Zdobin D.Yu. Low-temperature diagenetic transformation of phyllosilicates in shelf silts the Okhotsk Sea. International conference Clay, clay minerals and layered materials, Zvenigorod, 2009, p. 181.
48. Zdobin D.Yu. (and others) Geological Structure of South-Western Laptev Sea Region. Abstract. Polar petroleum potential. Texas, USA, 2009.
49. D. Zdobin, N. Kuten, Geotechnical Investigations of the Clay Soils on the Oil and Gas Condensate Perspective Structures of Okhotsk Sea Shelf (Practice and Theory). Arctic Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2011.
50. Zdobin D. Laboratory researches of soils as the major component of engineering researches. International conference EngeoPro-2011, Moscow с. 187-189.
51. Zdobin D.Yu. Stages of clayey sediments formation in the presence of the organic matter, IAEG XII Congress, vol. 6, 165-168, Torino, Springer, 2014.

Нормативные документы

52. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
53. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ. М.: Издательство стандартов, 2016. 14 с. (в печати).

Здобин Дмитрий Юрьевич

Морские органо-минеральные грунты.

Условия образования, состав, строение физико-химические свойства.

Автореф. дисс. на соискание учёной степени доктора геол.-мин. наук.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии «СВЕН»

194017, Санкт-Петербург, Удельный пр., д. 5