Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

На правах рукописи

БУДАНОВ Леонид Михайлович

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И РАЙОНИРОВАНИЕ ДНА И БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Специальность 25.00.36. - Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

> Научный руководитель: Сивков Вадим Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, директор АО ИО РАН, доцент кафедры географии океана БФУ им. Канта

Калининград 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОДХОДЫ К
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ И РАЙОНИРОВАНИЮ ДНА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ И
БЕРЕГОВЫХ ЗОН
1.1. Физико-географический очерк 11
1.2. Геологическое строение и история геологического развития в верхнем неоплейстоцене-
голоцене
1.3. Геоэкологическая изученность восточной части Финского залива и его береговой
зоны
1.3.1. Геолого-геофизическая и инженерно-геологическая изученность
1.3.2. Геоэкологическая изученность
1.3.3. Изучение и мониторинг экзогенных геологических процессов в береговой зоне
1.4. Характеристика антропогенной нагрузки на дно и береговую зону восточной части Финского
залива
Глава 2. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
2.1. Методика полевых геолого-геофизических исследований
2.1.1. Методика полевых геолого-геофизических исследований дна акватории
2.1.2. Методика полевых геолого-геофизических исследований субаэральной части береговой зоны
и прибрежной суши
2.2. Методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований 60
2.2.1. Методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований дна
акватории
2.3.2. Методика обработки и интерпретации результатов геолого-геофизических исследований
субаэральной части береговой зоны и прибрежной суши
2.2.3. Методический подход к совместной интерпретации геофизической информации, полученной
различными методами в пределах дна акватории, береговой зоны и приморских
территорий
2.3. Методика создания модели геологического строения дна акватории
2.3.1. Методика создания геоинформационной модели эколого-геологических условий дна
акватории
2.4. Методика и построения моделей палеоповерхностей рельефа и расчета мощности голоценовых
илов
Глава 3. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ДНА И БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ

ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА
3.1. Существующие подходы к геоэкологическому районированию дна морски
акваторий
3.2. Разработка критериев геоэкологического районирования дна и береговой зоны восточной част
Финского залива
3.3. Построение схемы геоэкологического районирования дна и береговой зон восточной част
Финского залива
Глава 4. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПАЛЕОДОЛИН АКВАТОРИИ ВОСТОЧНО
ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА11
4.1. Отечественный и зарубежный опыт исследований палеодолин и их роль в решени
градостроительных задач, водоснабжении и экологической безопасности 11
4.1.1. Современные представления о системе погребенных долин на севере Европы 11
4.1.2. Геологическое строение погребенных долин Санкт-Петербурга и Ленинградско
области
4.2. Особенности инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических услови
погребенных долин Санкт-Петербурга и Ленинградской области 12
4.3. Обобщенные физико-геологические модели палеодолин восточной части Финского залива и ег
береговой зоны
4.3.1. Обобщенные геологические разрезы палеодолин 12
4.3.2. Обобщенные геоэлектрические разрезы палеодолин
4.3.3. Обобщенные акустические разрезы палеодолин
4.3.4. Физико-геологические модели палеодолин
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

введение

Актуальность исследования

В последние десятилетия происходит активное хозяйственное освоение Финского залива: формируются насыпные территории, прокладываются подводные коммуникации, ведется гидротехническое строительство, включая берегозащитые сооружения, обустраиваются рекреационные зоны [Буданов и др., 2017]. В западной части российского сектора залива в 2010-2011 гг. был проложен участок газопровода «Северный поток», а в настоящее время выполнены изыскания и начинается строительство южной его ветки из Нарвского залива. Реализован проект строительства крупнейшего портового терминала «Усть-Луга». Особенно заметно усиление техногенного воздействия в восточной части залива. В Невской губе в постоянном режиме проводится дноуглубление, перемещение грунтов и создание их подводных отвалов. В 2006-2008 ΓΓ. здесь был реализован крупнейший инфраструктурный проект «Морской фасад», предусматривавший создание новых территорий и строительство пассажирского порта. Обсуждаются проекты по строительству в акватории залива искусственных островов (новых территорий), а на побережье ведется высотное строительство «Лахта-Центра». Все это приводит к заметному изменению донных ландшафтов и антропогенному загрязнению морской среды.

Вместе с тем, с точки зрения геоэкологической оценки и устойчивого развития геологической среды активное хозяйственное освоение региона имеет ряд нерешенных вопросов. Так, инженерно-экологические изыскания и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), которые выполняются в составе всех проектов, связанных с техногенным изменением природных условий, сталкиваются с серьезными трудностями при получении и интерпретации геологических данных, особенно на прибрежном мелководье. Особого внимания при этом требует развитая сеть погребенных долин (врезов), выполненная четвертичными отложениями – наиболее слабыми в инженерно-геологическом отношении. Погребенные долины, как известно, способствуют инфильтрации подземных вод и нарушению целостности водоносных горизонтов, что, в конечном счете, сказывается на условиях водоснабжения населения. При этом, в восточной части Финского залива (в том числе, Невской губе) и обширных мелководных акваториях Санкт-Петербурга (таких как Сестрорецкий Разлив) данные о погребенной дочетвертичной поверхности до настоящего времени носят преимущественно гипотетический характер [Буданов и др., 2017]. Проблемой является недостаточный объем бурения, что обусловлено его высокой стоимостью. В этих условиях единственной альтернативой являются геофизические методы исследования, а именно: методы инженерно-геологической интерпретации выделенных сейсмоакустических комплексов.

Еще одной геоэкологической проблемой хозяйственного освоения российского сектора Финского залива является разрозненность данных о состоянии окружающей среды. В ходе экологического мониторинга, проводимого различными организациями, оценивается уровень загрязненности воды и донных отложений российской части Финского залива (Гидрометслужба, «Севморгео», ВСЕГЕИ), а также – состояние биоты (Зоологический институт РАН). В результате сформировались значительные по объему массивы данных. Вместе с тем, они разнородны и разобщены. Поэтому высокую степень актуальности приобрели работы по геоэкологическому районированию, которое должно стать первым шагом к интегрированию данных о состоянии окружающей среды. Проведение такого районирования является неотъемлемой частью современного территориального и морского пространственного планирования, прогнозирования и комплексного управления хозяйственной деятельностью.

Объект исследования. *Объектом* диссертационного исследования является геологическая среда восточной части Финского залива и его прибрежной территории. Под геологической средой понимаются верхние горизонты литосферы, взаимодействующие (актуально или потенциально) с техносферой.

Предмет исследования. *Предметом* исследования являются геоэкологические аспекты устойчивого развития геологической среды восточной части Финского залива и прилегающей территории.

Цель и задачи исследования. *Целью* диссертационной работы является выявление пространственной дифференциации геологической среды восточной части Финского залива и прилегающих территорий на основе геоэкологического районирования с учетом роли погребенных палеодолин.

В ходе выполнения работы автором решались следующие задачи:

1. Разработка критериев геоэкологического районирования на основе анализа дочетвертичного палеорельефа и ключевых абиогенных элементов донных ландшафтов.

2. Выделение сейсмоакустических комплексов отложений по геотехническим свойствам, отражающих различные условия формирования геологической среды в неоплейстоценголоценовый этап развития восточной части Финского залива.

3. Составление картосхем рельефа поверхности дочетвертичных образований, ледниковых отложений, неоплейстоценовых отложений, современного рельефа дна, мощности голоценовых илов с применением геоинформационных систем (ГИС).

4. Обоснование оптимальных комплексов геофизических методов исследований, направленных на обнаружение, уточнение расположения и внутреннего строения палеодолин в пределах прибрежного мелководья и приморских территорий.

5. Анализ результатов геологических и геофизических исследований, палеорельефа, разработка региональных физико-геологических моделей погребенных долин.

6. Составление картосхемы геоэкологического районирования восточной части Финского залива.

Научная новизна

Впервые построены модели погребенного рельефа дочетвертичных образований, что позволило верхненеоплейстоценовых отложений и мощности голоценовых илов, пространственно локализовать зоны развития отложений с различными инженерно-геологическими свойствами, области различной направленности и интенсивности экзогенных геологических процессов, в том числе и обусловливающих геоэкологические условия. По результатам анализа модельных поверхностей выделены участки дна, перспективные с точки зрения обнаружения ландшафтов, связанных с краевыми ледниковыми комплексами. На основе анализа современного и погребенного рельефа дна восточной части Финского залива выявлены зоны наибольших уклонов, связанные с различными по возрасту и генезису реликтовыми формами рельефа (краевые морены, друмлины, подводные террасы и др.). Здесь наиболее вероятны проявления подводных гравитационных процессов, а также возможные зоны инфильтрации подземных и поверхностных вод, приводящих к ухудшению геоэкологического состояния района исследования.

Впервые получены фактические материалы о геологическом строении верхней части геологического разреза и абиогенных элементах современных субаквальных ландшафтов Невской губы и Сестрорецкого Разлива, отражающие положение древних погребенных врезов и особенности их заполнения. Определены компоненты морфологии, отдельные элементы структуры и характер их проявления в физических полях в условиях мелководной

акватории залива и его прибрежных территорий, разработаны физико-геологические модели погребенных долин региона.

Впервые для региона исследований разработаны критерии оценки геоэкологического состояния (степени опасности) геологической среды и на их основевыполнено районирование восточной части Финского залива и прилегающей территории.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Ключевыми параметрами геоэкологической оценки и районирования геологической среды в восточной части Финского залива и прилегающей территории являются рельеф (палеорельеф) и геотехнические свойства отложений, определяемые в результате комплексных геологогеофизических исследований.

2. На основе оригинальной (авторской) методики геоэкологического районирования в восточной части Финского залива выявлены участки с «напряженным» (32% площади дна) и «критическим» (11% площади дна) геоэкологическим состоянием, хозяйственное освоение которых может негативно сказаться на геоэкологической обстановке акватории.

3. Скопления тонкодисперсных осадков (алевропелитовых илов) в седиментационных бассейнах района исследований представляют собой депоцентры поллютантов и вследствие своей высокой адсорбционной емкости являются потенциальными источниками вторичного загрязнения акватории; площадь их распространения на поверхности дна составляет 4.3 тыс. км² (37% площади исследований), их объемы оцениваются в 62 км³.

4. На мелководных акваториях Санкт-Петербурга в дочетвертичных отложениях существуют погребенные врезы (шириной 0.5-3.2 км) двух физико-геологических типов, закономерно проявляющиеся в геофизических полях и различающиеся по уровню геоэкологической опасности: менее опасные – имеющие преимущественно глинистый состав заполняющих их четвертичных отложений и более опасные – заполненные преимущественно песчаным материалом.

Практическая значимость

Предложенные методы и подходы, а также полученные конкретные результаты использованы отделом региональной геоэкологии и морской геологии ФГБУ «ВСЕГЕИ» в отчетах по проектам Государственного мониторинга состояния геологической среды прибрежношельфовых зон Балтийского, Баренцева и Белого морей (2011-2019 гг.), разработке Генеральной схемы берегозащиты (2015-2016 гг.). Предложенные схемы геоэкологического районирования могут быть использованы при разработке планов Морского пространственного планирования для акватории Финского залива и Генерального плана Санкт-Петербурга, а также при экологических исследованиях, инженерно-экологических изысканиях и разработках ОВОС, проектов, планирующихся к реализации в восточной части Финского залива, Санкт-Петербурге и Ленинградской области.

Материалы и методы

В основу диссертации положены как комплексные геолого-геофизические фактические данные, полученные специалистами отдела Региональной геоэкологии и морской геологии ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 1980-2018 гг., в том числе при непосредственном участии автора во время работы в полевые сезоны с 2012 по 2018 гг., геофизические материалы, собранные в ходе факультативных полевых практических занятий кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского Горного университета, а также материалы производственных отчетов и сведения, опубликованные в научных изданиях. Полевые исследования включали непрерывное акваторное зондирование (НАЗ), непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП), однолучевое эхолотирование, георадиолокацию, электротомографию, гравиразведочную и магниторазведочную съемку, магнитотеллурическое зондирование (МТЗ), и сейсморазведку методом отраженных волн (МОВ). Анализ и обобщение геологической и геофизической информации о строении верхней части геологического разреза региона, распространении и особенностях как древних, так и современных ландшафтов. Проведение опытно-методических работ как традиционными для береговой зоны и мелководий геофизическими методами, так и методами гравиметрии и сейсморазведки МОВ общей средней точки (ОСТ). Комплексный анализ этой современной геофизической информации с применением новых методов обработки значительных массивов цифровых данных обеспечил построение модели верхней части геологического разреза дна и береговой зоны восточной части Финского залива. Геоэкологическое картографирование было выполнено с применением ГИС-технологий.

Достоверность выводов обеспечена комплексным использованием стандартных методов геолого-геофизических исследований, анализом большого объема данных, полученных за значительный промежуток времени с применением различных геолого-геофизических методов, согласованностью полученных результатов с результатами компьютерного моделирования и ранее опубликованными работами других авторов.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Результаты научного исследования соответствуют п. 1.3. «Исторические реконструкции и прогноз современных изменений природы и климата. Палеогеоэкология», п. 1.13. «Динамика, механизм, факторы и закономерности развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноз их развития, оценка опасности и риска, управление риском, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических процессов, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.», п. 1.16. «Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов» и п. 1.17. «Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования,

информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля» паспорта специальности 25.00.36 «Геоэкология».

Личный вклад

Основной объем полевых геофизических исследований, выполненных коллективом специалистов отдела региональной геоэкологии и морской геологии (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)на ключевых участках в восточной части Финского залива в рамках реализации проекта «Государственный мониторинг состояния геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» в 2012-2018 гг. и студентами и специалистами кафедры ГФХМР Горного университета в рамках факультативных практических занятий, был осуществлен под руководством и при непосредственном участии автора диссертации. Обработка и интерпретация результатов геофизических работ, а также оцифровка и переинтерпретация архивных материалов, их ГИС-анализ и построение карт и схем осуществлена автором диссертации. Автор участвовал в качестве исполнителя в международных научных проектах, смежных с тематикой диссертационной работы, в рамках которых также выполнялся сбор фактического материала: «Трансграничные инструменты морского пространственного планирования и сохранения Финского залива (ТОПКОНС)» («Transboundary tools for spatial planning and conservation of the Gulf of Finland (TOPCONS)». Finnish-Russian ENPI program.) 2012-2014; Европейская сеть морских наблюдений и данных (The European Marine Observation and Data Network (EMODNETgeology)) 2014-2016; а также в грантах Российского фонда фундаментальных исследований: «Изменения бассейна Балтийского моря за последние 60000 лет как результат взаимодействия климата, развития ледниковых щитов и океана.» 14-05-91763, «Развитие береговых морфосистем юго-восточной части Финского залива в ходе дегляциации и трансгрессивно-регрессивных колебаний уровня послеледниковых водоемов» 15-05-08169, «Генезис и типизация подводных уступов западной береговой зоны Самбийского полуострова на основе сейсмоакустических 15-35-50618; и Российского научного фонда «Воздействие глобальных, исследований» региональных и субрегиональных природных факторов на развитие береговых морфосистем восточной части Финского залива, как среды обитания человека» 17-77-20041.

Апробация

Результаты работы были представлены на международных конференциях: «XXI Международная Научная конференция (Школа) по морской геологии» (получен диплом), «Балтика 2016 – 13-й Коллоквиум геологии Балтийского моря» («Baltic 2016 – The 13th Colloquium on Baltic Sea Marine Geology»), «V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти

академика А. П. Карпинского», «13-я конференция и выставка Европейская ассоциация геоучёных и инженеров (EAGE) «Инженерная геофизика 2017»», «ХХІІ Международная Научная конференция (Школа) по морской геологии», «14-я конференция и выставка EAGE «Инженерная и рудная геофизика 2018», международной конференции «Генеральная ассамблея Европейского союза наук о Земле» («EGUGeneralAssembly 2019») и «1-й научно-практической конференции и выставке EAGE «Морские технологии 2019».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе две в изданиях, входящих в перечень ВАК, шесть в изданиях, индексируемых базой Scopus и две в разделах коллективных монографий. Одна статья принята в журнал «Региональная геология и металлогения», входящий в перечень ВАК.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.-м.н. В.В. Сивкову за поддержку и помощь в выполнении исследования, а также коллегам и соавторам публикаций из ФГБУ «ВСЕГЕИ» к.г.-м.н. Д.В. Рябчук, к.г.-м.н. А.Ю. Сергееву, к.г.-м.н. В.А. Жамойде, О.А. Ковалевой, И.А. Неевину, Ю.П. Кропачеву, д.г.-м.н. М.А. Спиридонову, к.т.н. Н.Н. Ефимовой, Ф.А. Леонтьеву, А.А. Московцеву, В.В. Хорикову, Д.В. Прищепенко за всестороннюю помощь. Особую благодарность автор выражает преподавательскому составу Санкт-Петербургского Горного университета: д.г.-м.н. А.С. Егорову, д.т.н. В.В. Глазунову, д.г.-м.н. Р.Э. Дашко, к.г.-м.н. Н.П. Сенчиной и к.т.н. Г.Д. Горельку, А.В. Чекулаеву за консультации, содействие в получении и обработке геофизического материала о палеодолинах. за всестороннюю помощь.

Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОДХОДЫ К ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ И РАЙОНИРОВАНИЮ ДНА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ И БЕРЕГОВЫХ ЗОН

1.1. Физико-географический очерк

Площадь восточной части Финского залива в пределах Российской Федерации составляет около 11 000 км² и протяженность более 130 км. Береговая линия изрезанная, и формирует крупные заливы, к которым относятся Нарвский, Лужский, Копорский, Невская губа – на юге и востоке и Выборгский залив с большим количеством узких заливов второго порядка и островов шхерного типа – на северо-западе. Невская губа после завершения строительства Комплекса защитных сооружений от наводнения (КЗС) была фактически отделена от основной акватории залива гидротехническим сооружением и превратилась в природно-техногенную лагуну [Атлас..., 2010].

Крупными реками, впадающими в Финский залив, являются Нева, Луга и Нарова. Общая площадь водосбора залива - 420 000 км².

Для восточной части Финского залива характерен климат умеренных широт. Соленость в российской части залива низкая и колеблется в пределах 1-8‰. В Невской губе вода опреснена за счет невского стока. Циркуляция вод характеризуется наличием системы постоянных течений в совокупности с временными волновыми, сгонно-нагонными, дрейфовыми и стоковыми явлениями. Скорость придонных течений, как правило, не превышает 0.1-0.4 м/сек [Лоция Балтийского моря, 1979]. Приливно-отливные колебания уровня воды в восточной части Финского залива незначительны (амплитуда 1-5 см). Средняя высота волн в период март-август (39-45%) – 1-2 м, а в сентябре – феврале (34-39%) – 2-3 м [Лоция Балтийского моря, 1979]. Современное волновое поле в прибрежных частях залива активно воздействует на донные отложения на глубинах до 3 – 3.5 м [Леонтьев, 2008], при экстремальных волнениях до глубины 8-10 м. Наиболее значительные подъемы уровня воды в восточной части Финского залива с прогрессивными вынужденными волнами, находящимися в резонансе с двигающимися над Балтийским морем и Финским заливом с запада на восток циклонами [Некрасов и др., 1999].

1.2. Геологическое строение и история геологического развития в верхнем неоплейстоценеголоцене

Геологическая среда акватории и береговой зоны восточной части Финского залива характеризуется высокой степенью изменчивости, обусловленной историей геологического развития региона с момента деградации последнего покровного оледенения [Атлас..., 2010; Рябчук и др., 2017]. На прибрежных территориях Санкт-Петербурга и Ленинградской области и в пределах акватории восточной части Финского залива широко развиты четвертичные отложения, образующие практически сплошной чехол на поверхности дочетвертичного субстрата. В основании разреза залегает комплекс поздневалдайских ледниковых образований верхнего неоплейстоцена, более ранние моренные и межморенные горизонты были эродированы в ходе распространения последнего оледенения и сохранились лишь локально в палеодолинах [Квасов, 1975; Спиридонов и др., 1989].

При деградации ледника в позднем неоплейстоцене происходило формирование аккумулятивного ледникового рельефа, сложенного моренными и локально песчано-гравийными флювиогляциальными отложениями [Ryabchuk et al., 2018а]. Особенности дочетвертичного рельефа, модифицированного ледником, способствовали формированию подпорных локальных приледниковых озер, которые постепенно слились в обширное, так называемое, Балтийское ледниковое озеро, глинистые отложения которого практически повсеместно перекрывают комплекс ледниковых образований [Субетто, 2009].

В результате проявления гляциоизостатических вертикальных движений земной коры и климатических изменений в голоцене происходили колебания уровня послеледниковых водоемов. Разрез неоплейстоценовых образований перекрывает маломощный голоценовый комплекс отложений Анцилового озера, существовавшего на исследуемой территории в пребореальный и бореальный период. Выше по разрезу залегают отложения литориновой и постлиториновой стадий развития Балтики, уже как морского бассейна, сформировавшегося при ее соединении в середине голоцена с океаном [Буданов и др., 2019]. В периоды максимумов трансгрессий воды Литоринового и Анцилового водоемов покрывали современное побережье, формируя обширные аккумулятивные морские террасы, при регрессиях уровень водных бассейнов опускался ниже современного уровня моря. Положение береговых линий этих водоемов до сих пор остается дискуссионным [Субетто, 2009; Атлас..., 2010; Andren et al., 2011; Ryabchuk et al., 2018b].

Под воздействием череды голоценовых трансгрессивно-регрессивных циклов периодически на значительных площадях создавались условия, обуславливающие замедление или прекращение осадконакопления, в результате чего происходило образование эрозионных горизонтов [Ryabchuk et al., 2018], корреляция которых затрудняется высокой степенью расчлененности поверхности доголоценового рельефа.

1.3. Геоэкологическая изученность восточной части Финского залива и его береговой зоны

1.3.1. Геолого-геофизическая и инженерно-геологическая изученность

Самые ранние данные о географо-геологическом изучении территории, на которой впоследствии возник Санкт-Петербург, появляются в шведской и российской литературе в период с середины XVI по начало XIX веков. Основными объектами этих исследований на суше являются строительные материалы и подземные воды с целью обеспечения нужд населения. Систематические геологические исследования были начаты в первой четверти XIX века после организации в городе Минералогического общества. Одной из первых опубликованных работ по геологии города является «Геогностическое описание Санкт-Петербургских окрестностей». В 1852 г. была издана «Геогностическая карта Санкт-Петербургской губернии» масштаба 1:420 000 (10 верст на дюйм), сопровождавшаяся геологическими разрезами и сводной стратиграфической колонкой [Спиридонов и др., 2004].

Изучение рельефа и верхней части геологического разреза Невской губы начались в первой половине XVIII в связи со строительством фортификационных сооружений в рамках Северной войны. С середины XVIII в. все гидрографические работы в Финском заливе сопровождались схематичным описанием «грунта» [Спиридонов и др., 2004]. Геологические исследования дна Невской губы проводились при строительстве различных укреплений, Петербургского порта и Морского канала [Журухин, 1894], углублении фарватеров, а также в связи с проектом железной дороги между С.-Петербургом и Кронштадтом через Лисий Нос. В 1885-86 гг. было пробурено 30 зондирующих скважин в районе Галерного фарватера в пределах изобаты 10 м [Пель, 1888].

С 1947 года начаты комплексные геолого-гидрогеологические геологосъемочные работы в масштабе 1:200000. Данные о составе грунтов и рельефе Невской губы постоянно пополнялись с конца 1940-х - начала 1950-х гг. за счет работ Госкомгидромета, Государственного гидрологического института, Ленгипротранса и целого ряда других проектных и строительных организаций [Спиридонов и др., 2004]. Исследования велись также силами Ленинградского государственного университета [Логвиненко и др., 1980; 1988; Барков и др. 1986; Окнова и др. 1990], Института Озероведения АН СССР, ВНИИКАМ, Гидрометеорологического института и ряда других организаций. Особенно эти работы в прикладном порядке активизировались на этапе перед началом строительства Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), когда были выполнены большие объемы работ по бурению в створе КЗС (Ленгидропроект и др.).

Значительный объем нового фактического материала был получен при начавшейся в середине 50-х годов прошлого века полистной геологической съемке масштаба 1:200 000, сопровождавшейся бурением структурных и картировочных скважин. В результате были

составлены первые кондиционные среднемасштабные геологические карты, которые стали базовым материалом для более детального изучения территории. Активное проведение различных геологических работ обусловило развитие палеонтологических, палинологических и литологических исследований с созданием крупных специализированных лабораторий, и в том числе Ленинградского геологического Управления (позже преобразованного в Петербургскую Комплексную геологическую экспедицию объединения Севзапгеология). В 1950-х – 1970-х гг. выполнены значительные объемы работ по поискам, оценке и разведке месторождений строительных материалов, других полезных ископаемых и месторождений пресных и минеральных подземных вод, большое количество сопутствующих и региональных геофизических исследований.

Систематические исследования верхней части геологического разреза и поверхностных отложений восточной части Финского залива были выполнены ВСЕГЕИ в ходе государственной геологической съемки шельфа восточной части Финского залива с Невской губой масштаба 1:200 000, завершившейся в 2000 г. (ГСШ-200).

Новая сводка и аналитическое обобщение геологической и эколого-геологической информации, в том числе для Финского залива, было выполнено во ВСЕГЕИ в 2005-2008 гг. в рамках проекта «Современная оценка ресурсного потенциала, контроль геологических опасностей и создание прогнозных моделей развития геологической среды Балтийского моря и его береговой зоны» по заказу Департамента по недропользованию по Северо-Западному федеральному округу (Севзапнедра). По результатам работ ВСЕГЕИ в 2010 г. был издан «Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря». В состав Атласа вошли: карта дочетвертичных образований, карта четвертичных отложений, литологическая карта поверхности морского дна, геоморфологическая карта, карта полезных ископаемых и прогнозно-минерагеническая карта, карта геологических опасностей, карта природно-техногенных факторов, влияющих на состояние геологической среды, карта эколого-геологического районирования, карта морфогенетических типов берегов, а также картосхемы загрязнения донных осадках и почвах [Атлас..., 2010].

В ходе геологического доизучения территории Санкт-Петербурга (ГДП-200 и ГДП-50) [Ауслендер и др., 2001ф] были составлены комплексные геологические, гидрогеологические, инженерно-геологические и эколого-геологические карты масштаба 1:50 000, в том числе и на восточную часть акватории Финского залива. Непосредственно на территории города частично проведено инженерно-геологическое картирование в масштабе 1:10 000. В последние десятилетия геологическое изучение территории Санкт-Петербурга наполнялось фактами, полученными при различных тематических и специализированных исследованиях, а также при обобщении в виде Государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000 второго и третьего поколения.

Геофизическую изученность Санкт-Петербурга можно условно разделить на три уровня по глубинности изучения. Так наибольшую глубинность (структура кристаллического фундамента) обеспечивают методы гравиметрической и магнитной разведки, сейсмология и точные топогеодезические съемки.

В период с 1950-х по 1980-е гг. на территории Санкт-Петербурга и ближайших окрестностей проводились исследования методом гравиразведки [Головин и др., 1960, Головина и др., 1966; Кулинич и др., 1967; Конева и др., 1982], по результатам которых составлены карты масштаба 1:200 000 в редукции Буге. Такой масштаб съемки достаточен только для среднемасштабного анализа геологического строения, а выделенные аномалии плохо коррелируются с данными бурения и аэромагнитной съемки. В 1957-58 гг. Э.Э. Фотиади составил первую структурно-геологическую карту кристаллического основания по материалам опорного бурения и аэромагнитной съемки, захватывающую площадь Ленинграда.

В 1993 году произведена аэромагнитная съемка [Мартынова и др., 1994] вокруг территории Санкт-Петербурга и над акваторией Невской губы, по результатам которой построена карта аномального магнитного поля масштаба 1:50 000 и схема геологической интерпретации масштаба 1:200 000. Эти данные хорошо отражают строение фундамента, позволяют выделить крупные разрывные нарушения. Электроразведочные методы применялись при изучении средней глубинности (кровля кристаллического фундамента, дочетвертичная осадочная толща).

На северном побережье Невской губы производились электроразведочные работы методами зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) различных масштабов [Левин и др., 1958; Дмитриев и др., 1981] по полученным данным уточнен погребенный рельеф кровли кристаллического фундамента, выделены разрывные нарушения, построены карты водоносных отложений. На южном берегу Невской губы применялись электроразведочные методы дипольного осевого зондирования (ДОЗ), ЗСБ, ВЭЗ и другие при гидрогеологическом обследовании территории, которые позволили изучить свойства ордовикских известняков.

Наиболее актуальные опубликованные данные о подземном пространстве города собраны в Геологическом атласе Санкт-Петербурга [Геологический Атлас..., 2009]. В Атлас вошли сведения о геологическом строении, гидрогеологическая и инженерно-геологическая характеристика территории города, данные о геологическом строении дна акватории Финского залива, зоны проявления современных геологических процессов и др.

Таким образом, несмотря на значительный объем имеющейся геолого-геофизической информации, до настоящего времени отсутствуют систематизированные и визуализированные в виде картосхем среднего масштаба данные о мощностях слагающих верхнюю часть геологического разреза отложений и их распределении в контексте их геотехнических и геоэкологических

(депонирующая среда, сорбционная способность) свойств. Существенный недостаток геологогеофизических данных наблюдается для наиболее опасных с точки зрения хозяйственного использования участков геологической среды в пределах палеодолин в акватории Финского залива.

1.3.2. Геоэкологическая изученность

Первые комплексные экспедиционные исследования Финского залива, направленные на получение как геологических и океанологических данных, так и на изучения условий местообитания морской фауны, были получены Н.М. Книповичем и С.А. Павловичем в 1908 г. во время составления разреза от о-ва Котлин до выхода в Балтийское море. Начало геохимическим исследованиям осадков Невской губы было положено в 1911-1912 гг. Г.В. Хлопиным (1913). В 1920 году гидрохимические, гидробиологические и геологические работы проводились под руководством К.М. Дерюгина (1923, 1925) [Спиридонов и др., 2004].

В 1967-1978 гг. в Финский залив был одним из районов экспедиционных исследований Атлантического отделения ИО АН СССР на судах «Профессор Добрынин» и «Академик Курчатов». Основные результаты этих работ, охвативших большие площади центральной и западной Балтики, изложены в ряде монографий [Геология Балтийского моря, 1976; Осадкообразование..., 1981; Геохимия осадочного процесса..., 1986].

Систематические исследования геохимии донных отложений Финского залива были выполнены ВСЕГЕИ в ходе геологического картирования в период с 1980 по 1995 гг. Полученный в ходе геологической съемки массив геохимических данных является важным источником базовой информации о состоянии геологической среды и основой дальнейшего мониторинга ее состояния. В 1990-е гг. под руководством ВСЕГЕИ были организованы экспедиционные рейсы международной программы "Морской экологический патруль (МЭП)". В это же время сформировалась система международных станций, на которых выполнялся геохимический мониторинг донных осадков, который до настоящего времени осуществляется по единой сети в Финляндии и Эстонии, а также эпизодически в России.

В 1993-1995 гг. эколого-геологический мониторинг был начат в Невской губе. Особое внимание уделялось геохимическим исследованиям, а также выделению и картированию техногенных фациальных обстановок [Шахвердов В.А., 1997]. Тогда же была заложена сеть станций мониторинга донных отложений и придонной воды Росгидромета.

С 1990-х гг. геоэкологический мониторинг постепенно разделился на отдельные направления, сфокусированные на различных геосферах и элементах экосистемы.

Экологические аспекты состояния биоты исследуются специалистами ЗИН РАН, СПбГУ, НИЦЭБ РАН. Специалистами с 2004 г. (с 2008 г. по утвержденной методике) осуществляются наблюдения в режиме мониторинга за состоянием планктонных и донных сообществ на акваториях Невской губы и восточной части Финского залива. Задачами наблюдений является выявление ранее несвойственных исследуемой акватории биологических видов («вселенцев» или «чужеродных») и

оценка их расселения, роли в формировании биологического разнообразия, практического значения для природопользования [Экосистема..., 2008; Орлова и др., 2015; Орлова, 2017].

Мониторинг водной толщи выполняется Северо-Западным территориальным Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) (15 станций в акватории залива) [Ипатова, 2017], Городским центром санитарно-эпидемиологического надзора (ГЦСЭН) (только в местах расположения пляжей, водозаборов и сбросов сточных вод), а также - по локальной наблюдательной сети - водопользователями. Широкое распространение получил спутниковый мониторинг [Минаков и др., 2008; Сухачева, 2014], позволяющий выполнять оценку концентрации в верхнем слое воды как минеральных взвешенных веществ, так и фитопланктона. Российским государственным гидрометеорологический мониторинг [Кочеткова и др., 2017] (в том числе, в рамках программы «Балтийский плавучий университет» [http://www.rshu.ru/bfu], разработана система подводного экологического мониторинга восточной части Финского залива с применением ГИС-технологий для сбора, хранения, анализа и выдачи информации [Александрова, Митько, 2013].

Наиболее сложная ситуация сложилась с выполнением геохимического мониторинга донных отложений на акваториях Финского залива и Невской губы. В 1999 г. в ФГУНПП «Севморгео» был сформирован Центр мониторинга геологической среды, который в 2000-2010 гг. осуществлял в восточной части Финского залива (мониторинг локального уровня) и Невской губы (объектовый мониторинг) отбор проб донных осадков и придонных вод по сети станций [Информационный бюллетень ..., 2007, 2009]. На борту судна проводились экспресс-измерения содержания растворенного кислорода, фосфатов, мутности, pH, Eh и минерализации в придонных водах. В пробах донных отложений производилось определение основных поллютантов: тяжелых металлов (ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, мышьяк, барий, свинец), нефтепродуктов, фенолов, АПАВ, ПАУ и ХОП. Для описания верхней части геологического разреза производилось сейсмоакустическое ЛЧМ-профилирование и гидролокация бокового обзора [Информационный бюллетень ..., 2012, 2013].

С 2011 г. мониторинг состояния геологической среды восточной части Финского залива, как одного из опорных полигонов Государственного мониторинга состояния недр прибрежношельфовой зоны Балтийского, Баренцева и Белого морей выполняет ФГУП «ВСЕГЕИ» [Информационный бюллетень ..., 2012, 2013; Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014]. С 2012 г. в этих работах принимает непосредственное участие автор данного диссертационного исследования. Стратегия мониторинга состояния геологической среды была усовершенствована. В Финском заливе были выделены ключевые участки, на которых активно проявлены геологические процессы и явления, которые могут потенциально относиться к категории геологических опасностей. В то же время в 2011-2015 гг., преемственность эколого-геохимических работ была сохранена, специалисты «Севморгео» привлекались к выполнению эколого-геохимического мониторинга по сети станций мониторинга в открытой части Финского залива. Эколого-геологические исследования в Невской губе выполнялись ВСЕГЕИ [Ryabchuk et al., 2017].

В 2012-2013 гг. ВСЕГЕИ по заказу Невско-Ладожского БВУ были выполнены детальные исследования состояния и прогноз развития южной береговой зоны Финского залива на участке от пос. Красная горка до КЗС в рамках проекта «Исследование влияния процессов переработки российских участков берега Балтийского моря, испытывающих существенное антропогенное воздействие, на качество морских вод и разработка рекомендаций по предотвращению загрязнения и засорения вод Балтики».

В настоящее время геоэкологический мониторинг состояния донных отложений по резко усеченной сети станций (8 станций в Финском заливе) выполняется Гидрометслужбой [Ипатова, 2017].

Кроме того, геоэкологические исследования на нерегулярной основе выполняются специалистами ряда научно-исследовательских институтов Санкт-Петербурга. Биогеохимические исследования в прибрежной зоне Финского залива осуществляются НИЦЭБ РАН с применением современных методом химического анализа донных отложений и биоты [Донченко и др., 2008; Поляк и др., 2018].

Геоэкологические работы в восточной части Финского залива являлись предметом совместных российско-финских исследований (ВСЕГЕИ-Геологическая служба Финляндии) по Проектам «Самагол», «Транзит» и «Бонус INFLOW» (2004-2010 гг.). CliPLiVe (2004-2014 гг.) [Ryabchuk et al., 2015] и проектов, выполняемых в рамках программы трехстороннего (Россия-Финляндия-Эстония) сотрудничества по Финскому заливу (в том числе, «Год Финского залива, 2014») [Raateoja, Setälä, (eds.), 2016]. С 2012 г. в этих проектах принимал участие автор настоящей работы.

В 2012-2014 гг. в рамках двухсторонней Программы Приграничного сотрудничества России и Финляндии в 2012-2014 гг. был выполнен проект «Трансграничные инструменты для пространственного планирования и охраны среды Финского залива (TOPCONS)», задачей которого было создание трансграничной карты подводных ландшафтов масштаба 1:500 000 и аналогичных карт на участки детальных исследований, а также оценку и ранжирование по значимости абиотических компонентов донных ландшафтов для распределения бентосной фауны. Автор диссертации принимал непосредственное участие в этих работа [Орлова и др., 2015; Неевин, Буданов, Сергеев и др., 2015].

Таким образом, к настоящему моменту накоплен достаточно большой объем данных разных лет о содержании в донных отложениях, воде и различных компонентах экосистемы Финского залива поллютантов (тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы, АПАВ, ПАУ и ХОП). В то же

время, отсутствие привязки результатов точечных измерений содержания потенциально опасных компонентов, осуществляющихся различными организациями, к строению и геотехническим свойствам отложений верхней части геологического разреза, пространственному распределению донных отложений, особенностям рельефа дна и придонной литодинамики, резко снижает информативность выполняемых исследований, возможность сравнительного анализа полученных результатов и применения их при общей оценке и прогнозирования геоэкологического состояния акватории Финского залива.

1.3.3. Изучение и мониторинг экзогенных геологических процессов в береговой зоне

Первые исследования динамики береговых процессов восточной части Финского залива были организованы в конце 1980-х – начале 1990-х гг. В 1987 – 1990 гг. сотрудники АН Эстонии под руководством Каарела Орвику осуществляли ежегодные маршрутные обследования берегов восточной части Финского залива, результатом которых было монографическое описание и первая классификация берегов, опубликованная в книге «Геология Финского залива» [1992]. Архив наблюдений, включающий описания берегов, фотоматериалы и результаты нивелирования, был в дальнейшем передан во ВСЕГЕИ, и является важным источником базовой информации для сравнительного анализа динамики берегов.

Научно-исследовательским институтом космо- и аэрометодов в геологии (НИИКАМ) в 1980-1990 гг. выполнялись детальные аэросъемки береговой линии масштаба 1:10 000 [Зубенко, 1995; Сухачева, Кильдюшевский, 2006]. В связи с усилением негативного воздействия на берега, ЛенМорНИИПроектом был произведен анализ состояния берегозащитных сооружений, разработан и реализован проект отсыпки экспериментального участка пляжа в пос. Комарово [Белов, 1995].

Новый этап береговых исследований в восточной части Финского залива связан с работами ВСЕГЕИ при участии НИИКАМ и РГГМУ в 2004-2009 гг. Были выполнены обзорные геологогеоморфологические маршруты, а также детальные геолого-геофизические работы на прибрежных мелководьях Курортного района, Невской губы, пролива Бьоркезунд, Лужской губы, южной береговой зоны в районе пос. Б.Ижора. Впервые было начато применение комплекса морских геолого-геофизических методов, дальнейшее развитие которого и внедрение в практику мониторинга состояния геологической среды прибрежно-шельфовой зоны осуществлено автором данной работы (ГЛБО по сети профилей, ОЭ, НСП в модификациях с источниками типа «Спаркер» и «Бумер», интерпретационный пробоотбор). При береговых маршрутах производилось литологическое опробование пляжей И сугубого мелководья. реечный промер И георадиолокационное профилирование [Спиридонов, 2010].

С 2004 г. мониторинг экзогенных геологических процессов, включающий, в том числе, наблюдения за скоростью абразии, выполняется ФГУП «Минерал» с привлечением специалистов ВСЕГЕИ в береговой зоне Санкт-Петербурга. На берегу выделена сеть опорных станций, на которых проводятся ежегодные наблюдения. В рамках этого проекта специалистами ВСЕГЕИ при непосредственном участии автора диссертационного исследования ежегодно выполняется георадиолокационное профилирование в субаэральной части береговой зоны, направленное на оценку мощности песчаных отложений.

В 2006-2009 гг. ФГУП «Минерал» и Геологической Службой Финляндии выполнялся проект ГеоИнфорМ программы ЕС «Лайф-Третьи страны», одним из результатов которого стало создание карты геологических рисков для территории Санкт-Петербурга, в том числе и его морской береговой зоны.

В 2015-2016 гг. были выполнены комплексные исследования субаэральной и субаквальной части морской береговой зоны Санкт-Петербурга в рамках проекта по разработке Генеральной схемы берегозащиты водных объектов Санкт-Петербурга, осуществленного СФ «Минерал» при участии специалистов ФГБУ «ВСЕГЕИ», ООО «Ленводпроект», ЗИН РАН, СПбГУ, НИИКАМ, ИО РАН, РГГМУ и др. организаций по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга. В работах принимал участие автор диссертационного исследования.

Таким образом, на данный момент составлено комплексное представление о состоянии береговой зоны Финского залива и ее развитии, выполнено ранжирование берегов по интенсивности опасных ЭГП, установлено, что наибольшее воздействие абразионных процессов испытывают ценные в рекреационном отношении участки берега в Курортном районе Санкт-Петербурга. Однако, основной объем исследований в настоящее время сосредоточен в крайней восточной части Финского залива. Учитывая значительную протяженность береговой линии и затратность полевых исследований, существует необходимость в региональной оценке береговых зон с точки зрения интенсивности опасных экзогенных процессов. 1.4. Характеристика антропогенной нагрузки на дно и береговую зону восточной части Финского залива

Исключительно высокий уровень антропогенной нагрузки на акваторию и береговые зоны восточной части Финского залива отмечается всеми исследователями, работающими в области экологии и геоэкологии морских акваторий России [Айбулатов, Артюхин, 1993; Айбулатов, 2005; Айбулатов, 2011; Донченко и др., 2008; Александрова, Митько, 2013; Ипатова, 2017; Кочеткова и др., 2017; Поляк и др., 2018; Экосистема..., 2008 и др.], а также специалистами Финляндии и Эстонии [Vallius, 2016; Raateoja, Setälä, (eds.), 2016 и др.].

Ретроспективный анализ техногенного воздействия на дно и береговую зону Невской губы приводится в монографии М.А. Спиридонова с соавторами [2004]. Крайняя мелководность Невской губы в сочетании с историей развития Санкт-Петербурга как крупнейшего промышленного и транспортного центра, а также военной базы, провели к достаточно интенсивному нарушению геологической среды дна акватории уже в XVIII-XIX вв. (строительство фортов на искусственных островах, ряжевых преград, дноуглубление в пределах фарватеров и др.). XIX - первая половина XX столетия характеризовались постоянным ростом объемов загрязняющих веществ, поступавших в акваторию Финского залива, достигнув максимума в 1980-х гг. [Финский залив..., 1999; Vallius, 1999].

Следует отметить, что с 1990 гг. наблюдается общая тенденция снижения содержания ряда поллютантов в донных отложениях, что связано как с падением уровня промышленного производства в 1990-х гг., так и с развитием и внедрением технологий очистки бытовых и промышленных сточных вод в странах водосборного бассейна Финского залива на протяжении последних десятилетий [Vallius, 2014; Raateoja, Setälä, (eds.), 2016; Ryabchuk et al., 2017]. В то же время, по данным мониторинга значительную с экологической точки зрения проблему представляют точечные источники поступления поллютантов, являющиеся причиной периодически выявляемых загрязнений геологической среды тяжелыми металлами, нефтепродуктами, фенолами, АПАВ, ПАУ и ХОП [Информационный... 2007; 2009; 2012; 2013; Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014; Ипатова, 2017; Ryabchuk et al., 2017 и др.]

Схема техногенной нагрузки на акваторию Финского залива была составлена В.А. Шахвердовым в 2008 г. [Атлас..., 2010]). Объектами картографирования были транспортные, инфраструктурные, а также другие объекты, сопровождающие деятельность человека, населенные пункты, ранжированные по численности населения, свалки бытовых отходов и места их переработки. Вынесены отдельные (вне пределов городов), преимущественно крупные, техногенные объекты: очистные сооружения, промышленные предприятия, ЛАЭС, порты и нефтяные терминалы. На акватории были обозначены затопленные потенциально опасные объекты,

свалки грунта (дампинга), разрабатываемые и предполагаемые к разработке месторождения полезных ископаемых, положение трассы Северо-Европейского газопровода (Нордстрим-1), основные фарватеры и рейдовые стоянки, области техногенного осадкообразования и выпадения техногенных радионуклидов (¹³⁷Cs). За прошедшее с момента создания «Атласа геологических и геоэкологических карт Российской части Балтийского моря» десятилетие, карта техногенной нагрузки устарела и нуждается в актуализации.

Основным источником техногенного воздействия на природную среду дна и береговой зоны Финского залива по-прежнему являются г. Санкт-Петербург с расположенными здесь портовыми мощностями, промышленной, транспортной, селитебной инфраструктурой, свалками промышленно-бытовых отходов.

Крупнейшим гидротехническим сооружением региона является Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). КЗС функционирует с 2011 г., когда он впервые был приведен в действие в ходе двух наводнений осени – начала зимы.

Разнообразный комплекс потенциально опасных для природной среды техногенных процессов связан с наличием и активным расширением портовых комплексов, таких как Большой порт Санкт-Петербурга, порты в г.Приморске, Высоцке, порт Усть-Луга.

Большой порт Санкт-Петербурга включает причалы морского торгового, лесного, рыбного, речного, нефтяного терминалов, судостроительных, судоремонтных и других заводов, морского пассажирского вокзала, речного пассажирского порта, а также причалы Кронштадта, Ломоносова, портовых пунктов Горская и Бронка. В связи с крайней мелководью восточной части Финского залива, необходимым условием функционирования портов, является наличие разветвленной системы каналов и фарватеров, а также регулярные дноуглубительные работы. Самым крупным фарватером является Санкт-Петербургский морской канал, которые обеспечивает навигацию судов с осадкой до 11.0 м, длиной до 260 м и шириной до 40 м. Суда больших размеров (преимущественно, нефтеналивные) обрабатываются на внешнем рейде (http://www.nord-news.ru/nord news/2012; www.severinform.ru). Кроме того, непосредственно на причалах порта Санкт-Петербург расположены крупные промышленные предприятия - ОАО «Балтийский судомеханический завод», ОАО «Завод ЖБИ и КМГС», ОАО «Канонерский судоремонтный завод», судостроительных заводов ОАО «Северная верфь» и ОАО «Балтийский завод», ОАО «Кировский завод». На северном побережье Невской губы в районе поселка Лисий Нос, у основания КЗС, расположен портовый пункт Горская, включающий пять причалов и подходной канал шириной 80 м. На юго-западном берегу Невской губы, также у основания КЗС, на искусственно созданных территориях расположен портовый пункт Бронка и нефтеналивной терминал компании «Несте» с пропускной способностью 500 тысяч тонн (http://www.nord-news.ru/nord_news/2012; www.severinform.ru).

В период с 2005 по 2018 гг. наибольшее техногенное воздействие, связанное с расширением и реконструкцией Санкт-Петербургского порта, было обусловлено реализацией проекта «Морской фасад» и строительством порта Бронка.

Интенсивность техногенного воздействия на геологическую среду и биоту при реализации в Невской губе проекта «Морской фасад» (основной цикл работ 2006-2008 гг.) была связана с одновременным осуществлением работ по намыву новых территорий, дноглублению в пределах фарватеров и дампингу в районах Южной и Северной Лахты [Рябчук и др., 2014]. Для создания нового пассажирского порта на Васильевском острове методом гидронамыва было образовано 230 га новых территорий. Кроме того, было выполнено масштабное дноуглубление фарватеров. Около 10% грунта было использовано для закладки в тела новых территорий, остальной грунт был подвергнут дампингу [Жигульский, 2017].

По данным Балтийской дирекции по техническому обеспечению надзора на море [Зайцев и др., 2010], 21.391451 млн м³ грунта, поднятого со дна Невской губы при реконструкции фарватеров и реализации первой очереди проекта «Морской фасад», было сброшено в отвалы Северной и Южной Лахты за период 2005-2008 гг. По годам динамика сброса грунта была следующей: 2005 г. - 1.2 млн. м³; 2006 г. - 12.2 млн. м³; 2007 г. - 7.5 млн. м³; 2008 г. - 0.4 млн. м³ [Зайцев и др., 2010].

Технология сброса грунта заключалась в использовании пульпопроводов, оборудованных специальными рассеивателями, обеспечивавшими равномерное распределение отвалов по площади. Было посчитано, что этот способ, по сравнению с перевозкой шаландами, является более экономичным. В то же время, с экологической точки зрения, использование пульпопроводов, очевидно, является значительно более опасным именно для данного района, который является транзитной зоной эстуария Невы. Легко переходящие в суспензию алевритовые и пелитовые фракции грунта, преобладающие в геологическом строении верхней части послеледникового разреза дна акватории, распространялись со шлейфами мутных вод на значительные расстояния от зоны сброса. Таких образом, зона рассеивания на порядки превысила площадь отвалов [Зайцев и др., 2010].

Результаты данного вида техногенного воздействия подробно рассмотрены в работах Л.Л. Сухачевой [Сухачева, 2014]. Сразу после начала работ концентрация взвеси в воде Невской губы резко возросла (рис. 1.1, 1.2). Анализ ряда космических снимков восточной части Финского залива, полученных с ИСЗ Тегга/МОDIS в летний период 2006-2008 гг., позволил специалистам [Сухачева, 2014] заключить, что масштабы загрязнения акватории взвесью (соответственно, и другими видами сопутствующих им загрязнений) были очень велики и превосходили отмечавшиеся ранее вследствие проведения работ по намыву городских территорий (в 70-е – 80-е гг.). О масштабах загрязнения можно судить по результатам тематического дешифрирования космических снимков Невской губы и восточной части Финского залива, полученных с ИСЗ ІКОNOS и TERRA/MODIS.

Существенное воздействие гидротехнических работ, проводимых в 2006-2008 гг. в Невской губе, на седиментационные процессы было установлено по результатам натурных наблюдений и [Информационный..., выполнявшихся «Севморгео» И «ВСЕГЕИ» мониторинга, 2009: Информационный..., 2011; Рябчук и др., 2014]. Комплексные эколого-геологические исследования дна северной береговой зоны Невской губы 2007-2008 гг. показали, что седиментационная обстановка в данном районе Невской губы коренным образом изменилась по сравнению с предыдущим периодом. По данным исследования и картирования, в 2000 – 2002 гг. на поверхности дна вдоль северного берега Невской губы, доминировали песчаные отложения. К 2007 г. в 28 из 35 станций донная поверхность покрыта тонкозернистыми осадками (илы, обводненные глины). В центральной и западной частях полигона тонкие осадки полностью формировали поверхностный слой, в восточной части – слой наилка мощностью до 3-5 мм на поверхности песков [Рябчук и др., 2014; Ryabchuk et al., 2017].



Рисунок 1.1. Увеличение концентрации взвеси в воде после начала реализации проекта «Морской фасад» [Сухачева, 2014].

В результате проведенных полевых исследований было установлено, что поверхностный слой глинистых осадков представляет собой техногенные отложения, сформированные в результате дампинга на Северной Лахтинской отмели. Было выявлено, что поверхностный слой тонкозернистых осадков подстилается плотными песками. Максимальная мощность слоя алевроглин составила 5 см. Кроме того, увеличение содержания пелитовой компоненты в гранулометрическом составе донных отложений установлено по всей площади дна Невской губы (рис. 1.3). Благодаря высокой сорбционной способности глинистой фракции, техногенные отложения, первоначально представленные ледниково-озерными глинами, быстро обогащаются

тяжелыми металлами и нефтепродуктами [Информационный..., 2009; Ryabchuk et al., 2016; Zhamoida et al., 2018].







Рисунок 1.2. А - Повышение концентрации взвеси в воде после начала работ по строительству «Морского фасада» [Сухачева, 2014]. 12.10.2006 г., IKONOS. Условные обозначения: 1 – очень высокие значения концентраций взвешенных осадков, 2 – высокие значения концентраций взвешенных осадков, 3 – средние значения концентраций взвешенных осадков, 4 – низкие значения концентраций взвешенных осадков, 5 – нефтяные пленки, 6 – отмели и мели, 7 – строящийся причал. Б - Загрязнение акватории Невской губы и восточной части Финского залива взвешенными веществами по данным Aqua/MODIS за 14 ноября 2007 г.: 1 – максимальные значения концентраций взвеси; 2 – высокие значения взвеси; 3 – средние значения концентраций взвеси; 4 – низкие значения концентраций взвеси; 5 – облака; 6 – тени от облаков [Сухачева, 2014].

По данным Балтийской дирекции по техническому обеспечению надзора на море длительное воздействие изъятия, перемещения и складирования грунта в подводные отвалы Невской губы, непосредственно после завершения гидротехнических работ, привело к значительной деградации как водной растительности прибрежных мелководий, так и травяного покрова в пределах прилегающих защитных полос. Ущерб от изменений сообществ водной и береговой растительности отразился на трофической цепочке рыбохозяйственного водоема за счет ухудшения качества мест нагула молоди рыб [Зайцев и др., 2010].

При определенных гидрометеорологических условиях при выполнении работ по проекту «Морской фасад» шлейф вод с низкой интегральной прозрачностью по данным космической съемки в 2005-2008 гг. прослеживался на расстоянии более 80 км к западу от места намыва. Следует отметить, что инженерные сооружения системы защиты города от наводнений существенным препятствием для распространения взвешенного материала не являлись [Сухачева, 2014].



Рисунок 1.3. Сравнение содержания фракции <0.01 мм в поверхностных донных осадках Невской губы (1993 и 2011 гг.).

В 2010 г. во внутренней части Невской губы, к востоку от южного створа КЗС началось строительство порта «Бронка», реализация которого также связана с масштабными дноуглубительными работами и дампингом грунтов. Проект строительства аванпорта Бронка реализуется в рамках Концепции развития перспективных районов (аванпортов) Большого порта Санкт-Петербург.

Работы начались с создания новой территории по контуру будущего порта. В 2014 г. начаты работы по дноуглублению подходного канала и акватории. В декабре 2014 г. глубина подходного канала и акватории достигла -7.5 м, объем дноуглубительных работ составил 16.6 млн. м³, глубина канала и акватории в декабре 2015 г. составила -14 м, общий объем работ по дноуглублению – более 30 млн. м³. Первая очередь комплекса запущена в декабре 2015 г., вторая и третья - в 2017 году. Завершение строительства планируется в 2020 г. (<u>http://www.nord-news.ru/nord_news/2012;</u> <u>www.port-bronka.ru</u>). В настоящее время порт Бронка представляет собой глубоководный терминал в границах Большого порта Санкт-Петербурга, способный принимать суда длиной до 347 м, шириной до 50 м и осадкой до 13 м (<u>http://www.port-bronka.ru/descr/istorija-cin-24</u>).

Как показывает анализ МДЗ, дноуглубительные работы при строительстве порта Бронка привели к резкому увеличению содержания взвеси в поверхностном слое воды Невской губы, шлейф вод с высокой мутностью распространялся на значительное расстояние от КЗС, достигая Копорской губы и архипелага Березовых островов [Сухачева и др., 2014].

Вторым по интенсивности техногенного воздействия на акваторию объектом, является расположенный в Лужской губе порт «Усть-Луга», позиционирующий себя как крупнейший порт на Балтике, второй по величине в России, и один из пяти крупнейших портов Европы. Ежегодно увеличиваются судозаходы и грузооборот порта (www.ust-luga.ru). За последние годы здесь введены в эксплуатацию автомобильно-железнодорожный паромный комплекс, комплексы по перегрузке угля и технической серы, многопрофильный перегрузочный комплекс «Юг-2», контейнерный комплекс, а также терминалы по перевалке нефти и нефтепродуктов. На сайте портового комплекса отмечается, что формирование территории комплекса портовых сооружений производится в основном из песка, добываемого при дноуглубительных работах в акватории губы (рис.1.4А) (www.ust-luga.ru).

В связи с началом строительства порта и изъятием больших объемов осадочного материала из прибрежных аккумулятивных песчаных тел, к 2007 г. на южном берегу произошло постепенное затухание аккумулятивных процессов, что выражается в уменьшении площади распространения бара в береговой зоне. В конце 1970-х годов площадь аккумулятивных песчаных тел составляла 2.24 км², в том числе площадь вдольберегового песчаного бара составляла 0.65 км². К 2003 году общая площадь зоны аккумуляции сократилась на 80% (до 0.5 км²) (рис. 1. 4Б) [Спиридонов и др., 2010].

Для восточного берега Лужского залива, по описаниям, сделанным в 1926 г., был характерен неширокий размывающийся пляж с активным береговым уступом, высотой 1.5 м. На сегодняшний день абразионное воздействие в береговой зоне продолжается. По данным анализа аэрокосмических материалов с 1970-х по 2007 гг. сокращение ширины пляжа составляло до 10 м. Максимальное уменьшение отмечается вблизи комплекса наливных грузов порта «Усть-Луга», далее к северу ширина пляжа сокращается постепенно.



Рисунок 1.4. А - изменение прибрежных ландшафтов в результате строительства терминала Усть-Луга. Б - сокращение песчаного бара в Лужской губе.

В 2005 г. в районе строительства порта начались активные дноуглубительные работы. В результате драгирования глубина прилежащих участков Лужской губы увеличилась с 2-5 м до 14-18 м. Наиболее эффективными комплексами методов изучения и картирования последствий воздействия дноуглубления на геологическую среду является применение НСАП и ГЛБО (рис. 1.5).

Максимальная концентрация взвеси в воде достигала 90 мг/л [Кийко и др., 2008]. Увеличение концентрации взвеси существенно повлияло на седиментационные процессы в районе порта. Естественная скорость осадконакопления в данном районе Финского залива составляет от 3-5 до 8-9 мм/год. Техногенные понижения донного рельефа, такие как фарватеры и карьеры по добыче песка, становятся седиментационными ловушками с аномальными скоростями седиментации, достигающими 3-5 см/год [Кийко и др., 2008].



Рисунок 1.5. Фрагмент профиля НСАП, показывающего результаты дноуглубления на участке дна Лужской губы, прилегающей к порту «Усть-Луга».

В ходе локального экологического мониторинга, проводившегося в 2006-2008 гг., на акватории Лужской губы в районе строительства гидротехнических сооружений выявлены изменения основных параметров биотической и абиотической среды [Кийко и др., 2008]. Так, отмечено существенное увеличение содержания в воде биогенов, железа, никеля, хрома и в отдельные периоды бенз(а)пирена, что, возможно, являлось результатом вторичного загрязнения вод в связи с дноуглубительными работами. Выявлено также существенное отрицательное влияние драгирования на бентосные сообщества, вплоть до полного уничтожения макрозообентоса. В настоящее время бентосные сообщества находятся в кризисном состоянии (возможно, в состоянии начавшегося восстановления в связи с прекращением дноуглубления). Изъятие грунта и

существенное увеличение глубины в районе проведенного дноуглубления привело к перестройке структуры донных сообществ с исчезновением ряда видов ракообразных и моллюсков, встречавшихся здесь ранее [Кийко и др., 2008].

Воздействие третьего крупнейшего активно развивающегося порта – нефтеналивного терминала в г. Приморске на природную среду Финского залива было менее существенным, так как благодаря расположению в проливе Бьоркезунд. Рельеф подводного берегового склона, характеризующийся резким увеличением глубины до 30-40 м на расстоянии менее 100 м от берега, позволил выполнить здесь строительство терминала без дноуглубительных работ.

По опубликованным данным, общий объем дноуглубления в Финском заливе за период с 2002 по 2017 гг. составил около 200 млн м³. Часть незагрязненных грунтов при таких работах, как правило, используется для создания новых территорий, остальной грунт сбрасывается в пределы подводных свалок грунта. В период с 2007 по 2017 гг. в порту "Усть-Луга" было использовано около 30 % этого материала. В подводные отвалы за последние 10 лет было сброшено более 126 млн м³ грунта (табл. 1.1) [Жигульский, 2017].

Таблица.1.1.

N⁰	Название отвала	Глубина, м	Міп расстояние до	Площадь, га
			оерега, км	
1	Южная Лахта	1,6-10,5	0	428
2	Северная Лахта	1,7-10,2	0,01	531,5
3	Маяк Толбухин	4,9-22,8	8,4	750,9
4	Южнее острова Большой Березовый	14-23	11	80,3
5	На выходе из Выборгского залива	4-8	0,4	131,8
6	В центральной части Лужской губы	16-25	5,6	721,6
7	В западной части Лужской губы	12-25,5	6,1	836

Характеристика отвалов грунта в восточной части Финского залива [Жигульский, 2017].

Портовые комплексы в гг. Высоцке (угольный терминал, нефтеналивной терминал распределительно-перевалочного комплекса нефтепродуктов, удаленный морской терминал, терминал по производству и перегрузке сжиженного природного газа) (<u>http://www.pasp.ru/strongport_vysock/strong</u>) и Выборге (в настоящее время функционируют 10 причалов, в том числе пассажирский, 3 причала для отстоя судов, 5 причалов для перегработки грузов, 1 причал для перегрузки неопасных грузов) (<u>http://www.pasp.ru/port_vyborg1</u>) обладают существенно меньшими мощностями и оказывают локальное воздействие на геологическую среду Выборгского залива.

Крупным инфраструктурным проектом, реализованным в 2013-2016 гг., является строительство Западного скоростного диаметра (ЗСД), Центральный участок которого расположен на побережье и в пределах акватории Невской губы.

Воздействие техногенеза на экзогенные геологические процессы

Наиболее существенное воздействие на экзогенные геологические процессы береговой зоны восточной части Финского залива оказывает Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). Повышение уровня воды при осенних и зимних штормах является одним критических факторов, способствующих активизации абразионных процессов. Таким образом, при закрытии створов КЗС, создается принципиально новая гидрометеорологическая ситуация – негативное гидродинамическое воздействие на берега Невской губы (к востоку от КЗС) резко снижается, в то время как к западу от сооружения это воздействие существенно возрастает. Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений был введен в строй в 2011 г., наблюдения показали, что абразионные процессы в береговой зоне Финского залива, непосредственно прилегающей к КЗС с запада, при штормах и нагонах осени 2011, 2013 и 2015 гг., резко активизировались [Ryabchuk et al., 2015; Ryabchuk et al., 2016; Ковалева и др., 2016].

Вторым по значимости фактором негативного воздействия на интенсивность абразии является подводная добыча песчаного материала. В соответствии с Перечнем участков недр федерального значения от 5 марта 2009 г. на Государственном балансе или выведенными за баланс числятся 17 месторождений песков и песчано-гравийных смесей на шельфе Балтийского моря. Общий запас составляет более 150 млн м³ песка. До настоящего времени разрабатывалось 6 месторождений (табл.1.2) [Жигульский, 2017].

Таблица 1.2.

	Название	Запас, тыс.	Площадь,	Глубины,	Владелец прав на	Срок
		M ³	га	М	месторождение	действия
						лицензии
1	Лондонская отмель	25 292,3	925	20	000 «Мортехника»	25.05.2027
2	мыс Стирсудден -	1 613,7	104,63	16,8	ЗАО «ЛСР-Базовые»	31.12.2017
	мыс Кюренниеми					
3	Сескар	31 320,8	3040	2,8-13	ЗАО «ЛСР-Базовые»	31.12.2019
4	Сестрорецкое	14 602	400,2	12,1	ООО БНК	26.02.2028
5	Стирсудденские	7 179,1	417,7	6-15	ЗАО «ЛСР-Базовые»	31.12.2018
	банки					
6	Темная Лода	3405	672	1,2-29	ЗАО «ЛСР-Базовые»	01.09.2035

Разрабатываемые месторождения песков в Финском заливе [Жигульский, 2017].

Часть месторождений (например, месторождение «Пески» на подводной террасе между м. Флотский и Песчаный; месторождение «Лондонская отмель»; месторождение в районе Лахты) активно эксплуатировались в 1970-1990-е гг. Выработанные месторождения Северной и Южной Лахты образуют котлованы свободным объемом 10-15 млн м³. Месторождение «Сестрорецкое» было выведено за баланс, т.к. было доказано, что его разработка могла оказать крайне негативное воздействие на прилегающие песчаные пляжи. При эксплуатации месторождений возникает весьма своеобразный сильно расчлененный техногенный рельеф, представленный подводными карьерами и останцами песчаной толщи, с относительными превышениями в пределах 10-15 м (рис. 1.6, 1.7). При этом, как показали мониторинговые исследования, восстановление песчаной толщи за счет потока наносов не происходило, т.к. описываемые подводные террасы являются реликтовыми формами рельефа. Подводные карьеры превращались в своеобразные «седиментационные ловушки», где начиналось накопление алевро-пелитовых илов. В Невской губе (карьеры в районе Лахты) скорости осадконакопления были аномально высокими (более 5 см/год), накапливающиеся осадки характеризовались высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами [Бутылин В.П. 1992; Vallius et al., 2006]. В случае, если при подводной добыче песков затрагивался современный подводный береговой склон, это, как правило, приводило к деградации расположенных выше по направлению потока наносов песчаных пляжей.



Рисунок 1.6. Схема-мозаика ГЛБО в районе подводных карьеров вблизи Лахты (Невская губа).



Рисунок 1.7. Рельеф дна Невской губы в районе Лахты (бывшие карьеры по добыче песка). Синий цвет – возвышенности, зеленый-желтый – понижения рельефа.

С 1990-х гг. месторождения песчаного материала, прилегающие к берегам, были законсервированы. Однако с 2011 г. вновь начата добыча песчаного материала на месторождениях «Пески», «Лондонская отмель». Данные о реальных объемах добычи в открытых источниках отсутствуют, что затрудняет оценку воздействия этого процесса на наблюдаемую в последнее десятилетие интенсификацию абразионных процессов в береговой зоне восточной части Финского залива [Zhamoida et al., 2018].

Исследования карьеров по добыче песка на подводной террасе м. Флотский – м. Песчаный показали, что останцы незатронутого техногенными процессами рельефа сложены песками от средне-мелкозернистых до средне-крупнозернистых. В подводных карьерах по добыче песка к настоящему времени сформировался слой алевропелитов мощностью более 50 см. Судя по внешним литологическим признакам (крупнослоистая текстура, сформированная чередованием прослоев черного и светло-серого цвета, мощность прослоев 1-2 см), можно предполагать достаточно высокую скорость осадконакопления и резкую периодическую смену окислительновосстановительный условий на границе дно – вода (рис. 1.8).

В 2014 г. ФГБУ «ВСЕГЕИ» были проведены исследования прибрежных мелководий острова Сескар, где ведется разработка месторождения песчаного материала. Для оценки состояния песчаного карьера в районе подводной террасы о-ва Сескар было выполнено профилирование методом НСАП. В качестве примера (рис. 1.9) показан профиль НСАП, пересекающий террасу в пределах подводного карьера. Относительная глубина техногенных депрессий достигает 5-7 м. При этом стоит отметить, что разработка ведется на глубинах моря от 7 до 16 м, т.е. теоретически в пределах зоны волнового воздействия. В то же время, расчлененный техногенный рельеф морского дна, сохраняющийся относительно длительное время, свидетельствует о заторможенности процессов волнового осадко- и рельефообразования.

Сохранность техногенных депрессий, кроме того, вероятно свидетельствует о современном дефиците песчаных наносов. Учитывая результаты обследования других подводных карьеров в восточной части Финского залива можно предположить, что в техногенных ложбинах, несмотря на небольшую глубину моря, могут накапливаться алевро-пелитовые илы.

Серьезной проблемой сохранности береговых ландшафтов является негативное воздействие морально и физически устаревшей системы берегозащиты, представленной бунами и валунными отсыпками, перпендикулярными береговой линии, а также частично или полностью разрушенными вертикальными волноотбойными стенками. В последние годы резко возросло негативное воздействие на береговые системы непродуманного строительства объектов рекреационной инфраструктуры, ведущееся при отсутствии законодательно предусмотренной экспертизы без учета закономерностей развития береговых процессов. В ряде случаев здания строятся непосредственно на пляже, разрушается авандюна. В ходе мониторинговых береговых маршрутов 2011 г. в пос.

Репино и Солнечное (Курортный район) было зафиксировано изъятие песка с внешней стороны авандюны для строительных целей, что совершенно недопустимо с точки зрения баланса наносов в береговой зоне [Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014].



Рисунок 1.8. Техногенно-измененный рельеф (подводные карьеры, образовавшиеся в результате добычи песка) подводной террасы м.Флотский – м.Песчаный (схема развития опасных экзогенных процессов и фрагменты сонограмм гидролокации бокового обзора) [Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014].

Таким образом, восточная часть Финского залива может быть отнесена к морским акваториям, подверженным исключительно высокому техногенному воздействию, к различным аспектам которого относятся:

- длительное нарастающее воздействие на природную среду восточной части Финского залива оказал сброс сточных вод крупнейшего в регионе мегаполиса – Санкт-Петербурга (при отсутствии до 1990-х гг. эффективных очистных сооружений), промышленных, транспортных и сельскохозяйственных предприятий региона, основная масса поллютантов накапливалась в седиментационных бассейнах восточной части залива;

- в настоящее время строительство новых территорий и активное развитие портов (порт Санкт-Петербург, Бронка, Усть-Луга, Приморск, Высоцк), промышленные и бытовые стоки, свалки промышленных и бытовых отходов в береговой зоне являются источниками интенсивного загрязнения донных отложений;



Б

Рисунок 1.9. Профили НСАП в районе подводных песчаных карьеров. А – подводная терраса м.Флотский – м.Песчаный [Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014], Б - подводная терраса ова Сескар.

- выполнение крупных инфраструктурных проектов по намыву новых территорий, дноуглублению и подводным отвалам грунта, связанных с изъятием, перемещением и сбросом больших объемов донных грунтов, в том числе тонкодисперсных и загрязненных, приводит к существенным негативным воздействиям на бентосные сообщества, повышению концентрации
взвеси в воде, изменению распределения поверхностных донных отложений, заилению пляжей, изменению береговых ландшафтов;

- в восточной части Финского залива выявлены и частично эксплуатируются ряд месторождений строительного песка и песчано-гравийной смеси; в 2006-2008 гг. выполнялась экспериментальная добыча железо-марганцевых конкреций [Zhamoida et al., 2018]; построена северная ветка газопровода Нордстрим (Нордстрим-1) и в настоящее время начата прокладка южной ветки (Нордстрим-2); в пределах восточной части акватории Невской губы сооружена часть трассы Западного скоростного диаметра;

- одним из наиболее значимых техногенных факторов воздействия на лито- и морфодинамику береговых зон восточной части Финского залива является Комплекс защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений. Завершение строительства КЗС и начало его эксплуатации (с 2011 г.) принципиально изменило характер гидродинамического воздействия на берега. Так как именно в условиях, соответствующих наводнениям (шторм западных направлений и резкий подъем уровня воды в заливе) происходят наиболее опасные размывы берегов, КЗС вносит в этот процесс дополнительный вклад. При закрытых створах КЗС угроза размыва берегов с его внутренней стороны (Невской губе) понижается, однако с внешней стороны, в том числе в пределах Курортного района, интенсивность абразии резко возрастает [Ryabchuk et al., 2015];

- повышению риска развития абразионных процессов на берегах способствует добыча песчаного и гравийно-галечного материала на подводных месторождениях на прибрежных мелководьях (до изобаты 10 м), приуроченных, как правило, к вдольбереговым террасам;

- отсутствие научно-обоснованной концепции территориального и морского пространственного планирования, неэффективность существующей системы берегозащиты, и, как следствие, необоснованные локальные меры по берегоукреплению, предпринимаемые владельцами объектов береговой инфраструктуры, а также зафиксированные в ходе мониторинга выемки материала пляжей и дюн для нужд строительства приводят к резким морфологическим изменениям в виде уменьшения ширины пляжей, деградации авандюн, расширения валунных бенчей [Информационный..., 2012; Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014; Ryabchuk et al., 2015; Рябчук и др., 2016; Ковалева и др., 2016];

- берега восточной части Финского залива подверглись значительному техногенного воздействию, в частности, восточный берег Невской губы может быть классифицирован как полностью техногенный.

Глава 2. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базовые карты и схемы геоэкологического районирования составлены в среднем масштабе (1:700 000). Основной картирования является переинтерпретация геолого-геофизических материалов, полученных ВСЕГЕИ в ходе государственной геологической съемки шельфа масштаба 1:200 000 (рис. 2.1, 2.2).



Рисунок 2.1. Схема картографических материалов для акватории восточной части Финского залива и территории Санкт-Петербурга [Атлас..., 2010]



Рисунок 2.2. Схема архивных фактических данных ВСЕГЕИ: 1 – государственная граница; 2 – архивные профили ВСЕГЕИ высокочастотного и низкочастотного НСП 1984–2018 гг.; 3 – станции донного опробования ВСЕГЕИ 1984–2000 гг.

Схемы масштаба 1:25 000 на восточную часть исследуемой площади составлены с более детальных исследований, привлечением материалов выполнявшихся в рамках прибрежно-шельфовых государственного мониторинга 30н, тематических научно-И исследовательских работ (рис.2.3).





Станции допного пробоотбора — Профили ГЛБО



2.1. Методика полевых исследований

2.1.1. Методика полевых геолого-геофизических исследований дна акватории

Изучение рельефа, подводных ландшафтов и геологического разреза на акваториях осложнено наличием водной толщи, которая препятствует проведению прямых наблюдений и экранирует изучаемую толщу, ослабляя регистрируемые сигналы. Процесс наблюдений затрудняется разнообразными специфическими помехами, а применение обычных для суши способов проведения работ практически невозможно. В то же время, при проведении съемки на акватории обеспечивается надежность и неизменность условий наблюдений. Водная среда позволяет производить непрерывные наблюдения, что на этапе интерпретации данных исключает необходимость интерполяции между точками наблюдений [Огильви, 1990]. Широкое применение получили методы морской геофизики, которые с успехом применяются с середины 50-х годов XXго века [Маловицкий и др., 1977]. Наибольшее распространение в морской геофизике получили методы сейсморазведки, электроразведки и магниторазведки.

Крайнюю восточную часть Финского залива (восточнее линии м. Шепелево – Озерки) можно отнести к так называемым мелководным акваториям, при работах на которых применяются методы морской геофизики в специальных модификациях, адаптированных к небольшой мощности водного слоя, а приемы обработки отличаются от стандартных [Шалаева, Старовойтов, 2010].

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП)

Сейсмические методы исследований традиционно применяются на акваториях при изучении верхней части отложений [Малаховский и др., 1984]. Наблюдения, в зависимости от множества факторов (глубина моря, геолого-геоморфологические особенности конкретного региона, бюджет работ и др.), производят с различными модификациями систем наблюдений (одноканальные, многоканальные, 3Д системы), с использованием низко- и высокочастотных источников упругих колебаний [Huuse et al., 2000; Спиридонов и др., 2010].

При изучении геологической среды мелководных акваторий одноканальный вариант сейсмоакустических наблюдений – метод непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) применяется значительно шире, чем многоканальные наблюдения. Уменьшение глубины моря понижают полезную глубинность исследований, кратные отражения накладываются на полезный сигнал. В процессе обработки подавление таких помех не всегда завершается успехом, и тем больше вероятность негативного результата, чем глубины акватории меньше.

Сейсмоакустические наблюдения на мелководье обладают некоторыми особенностями по сравнению с обычными сейсмическими работами на акваториях. Типичными сейсмогеологическими свойствами таких акваторий являются следующие:

- обычно наиболее резкой границей в разрезе является граница вода-дно, тогда как поддонные границы характеризуются малыми скачками акустических свойств;

- имеет место высокое поглощение сейсмической энергии в придонных осадках;

- акустические свойства осадков на дне могут существенно меняться с глубиной, образуя градиентные слои.

Требуемая глубинность исследований на мелководьях, как правило, больше глубины воды, это приводит к возникновению кратных волн, которые накладываются на полезные отражения, что оказывает существенное влияние на выбор методики и последующей обработки данных, а в некоторых случаях делает невозможным получение информации. Такие сейсмогеологические свойства обуславливают специфику сейсмоакустических наблюдений на мелководье, состоящую в малой энергии источника сейсмических колебаний, широкой полосе частот возбуждения и регистрации и низком соотношении сигнал/шум [Шалаева, Старовойтов, 2010].

Основным источником информации о геологической среде и конфигурации поверхностей палеорельефа (палеоландшафтах) исследуемой акватории при выполнении данной работы было НСП. При НСП измерительная установка состоит из одного источника (группы источников) и одного приемника (группы приемников), расположенных так, чтобы расстоянием между ними можно было пренебречь по сравнению с глубиной исследований, иначе говоря, считать их совмещенными в пространстве (рис.2.4). Метод НСП является одной из модификаций сейсмических наблюдений МОВ. Возбуждение и регистрация упругих колебаний производятся через такие интервалы времени, чтобы получать практически непрерывную запись.



Рисунок 2.4. Принципиальная схема системы наблюдений НСП.

При непрерывном движении по профилю НСП позволяет изучать конфигурацию дна и значительной части поддонных отложений, мощность которой может составлять как первые метры, так и сотни метров в зависимости от выбора источника и особенностей изучаемой среды.

Для оценки информативности метода при изучении палеодолин по априорным моделям погребенных долин были получены синтетические сейсмограммы в программе Tesseral. Размер модели выбирались таким образом, чтобы врез был изображен целиком, а в нижней части был слой дочетвертичных отложений. Сейсмическим комплексам, входящим в модель, были присвоены скорости продольных и поперечных волн и плотность.

При моделировании использовалась система наблюдений с совмещенным источником и приемником, шаг между пунктами взрыва составил 2 метра (для воссоздания непрерывной записи). Центральная частота зондирующего сигнала составила 0.5 кГц, форма импульса - минимально фазовая. В работе было использовано моделирование на основе конечно-разностного решения упругого волнового уравнения, создающего наиболее близкую аппроксимацию к реальным условиям твердой среды, включая эффекты обмена и волны сдвига (поперечные). Этот вид моделирования учитывает не только распределение в среде скорости волн сжатия и плотности, но требует также знания (по крайней мере, оценки) соответствующей скорости волн сдвига. В некоторых областях модели задается нулевая скорость поперечных волн, что позволяет выполнять моделирование различных сред (твердые тела и жидкость одновременно). Результаты моделирования сохранялись в формате *.sgy для дальнейшего анализа (рис. 2.7).

Результаты моделирования подтвердили возможность применения сейсмоакустических методов для изучения палеодолин. На синтетических сейсмограммах отчетливо прослеживаются полезные отражения как на границе четвертичных и дочетвертичных отложений, так и внутри четвертичной толщи. Интенсивные кратные волны наблюдаются на больших временах (ниже по временному разрезу полезных). На реальных же сейсмограммах, как правило, эти помехи связаны с переотражениями в водном слое и накладываются на отражения менее глубоких границ. Результаты проведения полевых наблюдений позволили локализовать погребенные врезы, изучить их форму и условия залегания, заполняющих их, рыхлых отложений, но несут лишь качественную информацию о составе и косвенные сведения о возрасте пород.



Рисунок 2.7. Результат сейсмоакустического моделирования по априорной модели погребенной долины, выполненного в программе Tesseral.

выполнении непрерывного сейсмоакустического профилирования При применялся сейсмоакустический приборно-аппаратурный комплекс GEONT-HRP (производство ООО «Спектр-Геофизика», Россия). В качестве источника упругих колебаний использовался электродинамический излучатель типа «бумер» с рабочими частотами 0.2-5 кГц. В состав входят также высоковольтный накопитель электрической энергии Jack-2500 комплекса (производства ООО "Геодевайс", Россия), одноканальная приемная коса длиной 2 м, усилитель с полосой пропускания 30–10000 Гц и набором фильтров высоких и низких частот, многоканальный аналого-цифровой преобразователь, цифровой блок управления и компьютер типа ноутбук с установленной программой регистрации «Seismic Profiling E440», разработанной в МГУ [Гайнанов, 2010]. Для буксировки источника используется специальный небольшой катамаран (рис. 2.8).



Рисунок 2.8. А - Катамаран с установленным излучателем (бумер), Б - Накопители энергии Jack-2500, В - Аппаратурно-программный сейсмоакустический комплекс «ГЕОНТ -Шельф».

При экспедиционных исследованиях бумер крепится под буксировочным катамараном на расчетной глубине: бумер и сейсмокоса на глубине 20-25 см, соответствующей четверти длины волны в воде. Катамаран буксируется за кормой судна с выносом от кильватерной струи на два метра, а сейсмокоса – с выносом на три метра. Таким образом, реальное расстояние источник-

приемник 1 метр, но т.к. глубинность изучения на порядок больше – при дальнейшей обработке для упрощения расчетов их считают совмещенными, а получаемые сейсмограммы – разрезами t₀. Запуск источника и начало записи осуществляется от ЭВМ через цифровой блок управления. На экране компьютера визуализируется временной сейсмоакустический разрез в черно-белом виде, а также вспомогательная информация: номера трасс, время записи, координаты по данным GPS приемника, значения задержки и т.д. Инструментальная разрешающая способность источника типа «Бумер», при скорости распространения упругих колебаний в воде равной 1470 м/сек, составляет около 0.4 метра. Скорость передвижения судна по профилю составляет около 7-10 км/час [Гайнанов, 2006].

Гидролокация бокового обзора (ГЛБО)

Гидролокация бокового обзора (ГЛБО) – геофизический метод, используемый для получения площадной информации, обладающей достоверностью, о рельефе морского дна, вещественном (гранулометрическом) составе донных осадков, а также техногенных объектах на поверхности дна. Съемки ГЛБО в режиме мониторинга дают возможность изучения изменений микрорельефа дна, динамики поверхностных отложений (размыв, заносимость, зоны динамичных песков, знаки ряби и т.д.), а также последствий техногенного воздействия на дно и возможности восстановления естественных условий после его завершения [Волохин и др., 1985; Неевин, Буданов и др., 2015; Буданов и др., 2014].

Работа гидролокатора бокового обзора (сонара) основана на принципе активной эхо-локации. Буксируемая приемопередающая антенна сонара периодически излучает акустические импульсы перпендикулярно курсу судна, диаграмма направленности приемопередатчика имеет малый угол в горизонтальной плоскости и довольно большой в вертикальной [Неевин, Буданов и др., 2015] (рис. 2.13).

При выполнении данной работы ГЛБО использовалось для исследования интенсивности опасных экзогенных геологических процессов в пределах прибрежных мелководий, примыкающих к наиболее ценных в рекреационном отношении районов восточной части Финского залива (Курортный район, Невская губа), а также фиксации подводных потенциально опасных техногенных объектов. Работы выполнялись с помощью гидролокатора СМ-2 (С-МАХ, Великобритания). Использовалась рабочая частота 325 Кгц (ВЧ), дальность обзора при этом составила (с левого и правого борта) 100 м, часть профилей выполнялась в диапазоне 75 м.

Работы осуществлялись по регулярной сети профилей субмеридионального направления, пройденных с шагом 200 м, что обеспечило непрерывное покрытие дна съемкой ГЛБО. Общая протяженность профилей, выполненных на прибрежных мелководьях Курортного р-на в 2005-2011 гг. составила более 600 км, а в 2012-2018 гг. при личном участии автора более 500 км погонных (рис. 2.2, 2.14).



Рисунок 2.13. Принцип работы гидролокатора бокового обзора. V – скорость судна; Н – высота антенны над поверхностью дна; R - наклонная дальность; X – линия профиля; Y - направление строки сонарограммы; dx, dy - продольная и поперечная составляющие разрешающей способности гидролокатора соответственно; θ y - угол раскрытия диаграммы гидролокатора в горизонтальной плоскости [Неевин, Буданов и др., 2015].

В результате была полностью покрыта съемкой поверхность дна от пос. Репино до пос. Серово в интервале глубин 5–10 м и более. Часть профилей выполнялась в режиме повторных съемок, что позволило построить схемы градации интенсивности литодинамических процессов (СП 11-114-2004). В Курортном районе, Невской губе и по периферии о-ва Котлин в 2004-2011 гг. было выполнено более 700 км профилирования, в 2012-2018 гг. – непосредственно автором более 1500 км (рис. 2.2).

Однолучевое и многолучевое эхолотирование (ОЭ и МЭ)

Однолучевым эхолотированием сопровождались все исследования на акватории, что позволило, в частности, существенно уточнить и актуализировать схемы современного рельефа дна, построенные на основе оцифровки навигационных карт.

Многолучевое эхолотирование выполнялось на одном мелководном полигоне и двух полигонах в открытой части Финского залива. На ключевом участке в субаквальной части береговой зоны Курортного района целью работ было выявление геоморфологических аномалий, исследование морфодинамики субаквальной части береговой зоны Курортного района и фиксация подводных потенциально опасных объектов. В ходе работ выполнялась детальная съемка рельефа дна способом площадного обследования многолучевым эхолотом по галсам съемки общей протяженность 100 км погонных, с перекрытием полос съемки дна не менее 20%.



Рисунок 2.14. А - Гидролокатор СМ-2 на борту судна «Риск». Б, В - обзорная схема расположения профилей ГЛБО в Курортном р-не: Б – с 2006 по 2014 гг.; В – 2015 г.

Обследование осуществлялось гидрографическим комплексом на базе многолучевого эхолота Kongsberg EM2040C установленном на гидрографическом катере «49-3911» (рис. 2.15). Частота эхолота составила 300 кГц, точность измерения планового положения прибора менее 2 м в режиме DGPS по данным ККС «Маяк Шепелевский». Для введения поправки на гидрологические условия производилось измерение скорости звука в воде прибором Valeport mini SVP № 38433, с точностью измерения ±0.02м/с. Средняя квадратическая погрешность измеренной глубины составляет 0.1 м. Также вводилась поправка за крен, дифферент судна и волнение моря по данным датчика динамических перемещений судна IXsea Octans III с точностью вертикального перемещения – 5 см; крена и дифферента судна 0.01°.

Дальнейшая обработка полученных материалов производилась с использованием программного обеспечения QPS QINSy 8.1. Построение мозаики выполнено с использованием программного обеспечения QPS Fledermaus Geocoder.



Рисунок 2.15. А – Гидрографический катер, осуществляющий многолучевое профилирование; Б – Принцип действия многолучевого эхолота.

Метод непрерывного акваторного зондирования (НАЗ)

Электроразведка – совокупность методов изучения строения Земной коры, основанных на изучении естественного или искусственного электромагнитного поля [Доброхотова, Новиков 2009]. Электроразведочные методы разделяют на электромагнитное зондирование и электромагнитное профилирование. Первые позволяют осуществить вертикальную стратификацию геологического или гидрографического разреза, вторые же фиксируют изменения параметров по латерали [Огильви, 1990]. Методы электроразведки в различных модификациях применяются для решения широкого спектра задач, выбор конкретного метода осуществляется исходя из реальной геологогогогорафической обстановки, поставленных задач и экономической целесообразности его применения [Доброхотова, Новиков, 2009].

Для изучения геологической среды мелководной части акватории Финского залива ввиду высокой изменчивости верхней части геологического разреза по латерали и его осадочного происхождения использование методов сопротивлений представляется наиболее перспективным. На данный момент существует методика, обеспечивающая непрерывные измерения – непрерывное электрическое акваторное зондирование (НАЗ), разработанная в лаборатории малоглубинной электроразведки геологического факультета МГУ [Андреев и др., 2009].

При изучении геологической среды и абиотических компонентов подводных ландшафтов целесообразно применение электромагнитных зондирований в комплексе с профилированием. Так как мощность четвертичных отложений увеличивается в пределах палеодолин, на глубинах 50-120 метров от поверхности более существенной становится вертикальная неоднородность, сведения о которой позволяют изучить морфологию врезов.

Для оценки возможностей метода при изучении палеодолин, выбора оптимальных параметров системы, а также оценки уровня сигнала и разрешающей способности метода было выполнено моделирование. На основе априорной геологической модели и справочной информации

[Зинченко, 2005; СП 11-105-97; Матвеев, 1985; Шевнин, 2006] составлена геоэлектрическая модель погребенной долины, характерной для акватории Невской губы.

Моделирование было выполнено в программе ZONDRes2D. К особенностям используемого софта можно отнести использование математического аппарата метода конечных элементов при решении прямой задачи, а также возможность выбора метода инверсии при решении обратной задачи [Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации - ZondRes2d, 2016].

При моделировании использовались расстановки с различными конфигурациями системы наблюдений. Модели представляли из себя верхние 45 метров разреза палеодолины. Было выполнено решение прямой задачи для шести различных по конфигурации и свойствам моделям палеодолин. В результате были получены синтетические электротомографические разрезы (рис.2.16).



Рисунок 2.16. Пример моделирования в программе ZondRes2d.

Наилучший результат в восстановлении исходной модели погребенных долин показало сочетание установки Шлюмберже в качестве взаиморасположения электродов на моделируемом разрезе и метода наименьших квадратов с регуляризацией в качестве метода инверсии.

Технология НАЗ предусматривает использование одного низкочастотного генератора тока, многоканального измерителя и плавающей электроразведочной «косы» [Андреев и др., 2009]. Для возбуждения поля применялся электроразведочный генератор «АСТРА-100» (ООО "Северо-Запад", Россия). В качестве регистрирующей аппаратуры использовался многоканальный электроразведочный измеритель «ИМВП-8» (ООО "Северо-Запад", Россия) подключенный к ноутбуку (рис. 2.17). В качестве рабочей установки использовалась инверсная симметричная установка Шлюмберже, в которой в центре «косы» расположен питающий диполь, а множество пар электродов приемных линий расходятся от центра к периферии (рис. 2.18).

Перед съемкой в лабораторных условиях, в соответствии с инструкцией [Инструкция по эксплуатации «ИМВП», 2011] выполнялась калибровка измерительной аппаратуры, по результатам которой формируется калибровочный файл, используемый при первичной обработке полевых данных. После монтажа и спуска измерительной косы на воду производились измерения сопротивления заземления, которые позволяют удостовериться в отсутствии разрывов в «косе» и ее работоспособности.



Рисунок 2.17. Аппаратурный комплекс используемы при работе методом НАЗ. 1 - генератор «АСТРА», 2 – многоканальный измеритель «ИМВП-8», 3 – ноутбук с программой регистрации в режиме записи.

Профили съемки были расположены перпендикулярно предполагаемой ориентации тальвега (линии, соединяющей самые глубокие точки врезов), для обеспечения получения информации об обеих бортах долин. Электроразведочная коса буксировалась со скоростью 3-5 км/ч (рис. 2.19), регистрация данных начиналась после ее полного выпрямления. На ноутбуке, с которого осуществлялось управление и регистрация данных, была установлена программа «Octopus Registrator» от разработчиков аппаратуры. Контроль качества информации осуществлялся во время съемки по отображаемому на экране компьютера уровню сигналов на каждом канале «ИМВП-8» и их соотношению.



Рисунок 2.18. Схема измерительной установки НАЗ.

Ток, питающий линии, устанавливался максимально возможный для работы генератора без сбоев и в Невской губе составлял от 316 мА в закрытой части акватории до 500 мА в ее открытой части. Установка больших значений приводила к перегрузке генератора и его остановке. Базовый шаг между электродами «косы» составлял 5 метров.



Рисунок 2.19. Буксируемая электроразведочная «коса».

Донный пробоотбор

Донный пробоотбор намечался по результатам первичной интерпретации геофизических данных на участках наибольшей дифференциации разреза. Отбор проб осуществлялся традиционными методами с применением ударных грунтовых трубок длиной до 5 м. 2.1.2. Методика полевых исследований субаэральной части береговой зоны и прибрежной суши

Метод электротомографии

Одним из направлений электроразведки является группа методов сопротивлений, изобретение которого относится к началу XX в. [Schlumberger, 1920]. В конце XX-го века разработан метод, совмещающий преимущества традиционных вертикальных электрических зондирований и электропрофилирования – так называемые сплошные электрические зондирования [Бобачев и др., 1996]. В России к настоящему времени был закреплен термин электротомография (ЭТ), который вошел в «Свод правил» Госстроя России [СП 11-105-97, 2004].

Полевые исследования методом электротомографии основаны на применении способной многоэлектродных электроразведочных кос. подключаемых к аппаратуре, коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы. Использование таких технологий на порядок увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений, по сравнению с классическими методами сопротивлений [Бобачев и др., 1996].

Для оценки возможностей метода при изучении палеодолин, выбора оптимальных параметров системы, а также оценки уровня сигнала и разрешающей способности метода было выполнено имитационное моделирование. Моделирование выполнено по схеме, описанной в разделе данной главы, посвященном методу непрерывного акваторного зондирования (НАЗ), выявлена оптимальная геометрия расстановки.

С целью подтверждения эффективности метода ЭТ в исследованиях погребенных долин береговой зоны Финского залива, а также сбора полевого материала были выполнены опытнометодические работы. Съемка была произведена по вдольбереговым профилям, расположенным на пляже не далеко от уреза. Для профилей характерен незначительный (менее 0.5 метров) перепад высот, который без потери достоверности можно не учитывать при инверсии данных. Вдоль профиля в ряд с шагом 5 метров в песок на глубину около 40 см устанавливались титановые электроды, к которым подсоединялись клеммы электроразведочной косы.

Измерения методом ЭТ проводились с использованием 48-ми канальной электроразведочной станции «Скала-48», разработанной в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, и двух 24-х электродных электроразведочных кос длина каждой из которых составляла 120 метров, в соответствие с инструкцией [Аппаратурная..., 2016; Буданов и др., 2014] (рис. 2.20).

После расстановки электроразведочных кос и их подключения к измерительному прибору осуществлялась оценка сопротивлений заземления всех электродов расстановки.

Работа прибора проходила в режиме «Automatic», предназначенном для ЭТ. По результатам имитационного моделирования в качестве протокола съемки на полевой расстановке использовалась стандартная схема, в которой все измерения осуществлялись симметричной расстановкой Шлюмберже с базовым шагом между электродами 5 м (рис. 2.21). Так как в работе использовалось два кабеля, продолжение съемки осуществлялось по схеме «продолжающего профиля» с переносом первого кабеля на место второго в следующей расстановке. С каждым дополнительным продолжающим профилем захватывался новый сегмент изучаемого разреза, повторные же измерения на отработанной части не производились. Такая методика съемки позволила минимизировать время съемки на одной расстановке, а полученные вдоль всего профиля данные, можно было обрабатывать совместно.



Рисунок 2.20. Внешний вид аппаратуры «Скала-48».



Рисунок 2.21. Принципиальная схема наблюдений методом ЭТ с использованием 48-ми канальной электроразведочной станции «Скала-48» по схеме «продолжающего профиля».

В результате таких работ были получены геоэлектрические разрезы кажущегося электрического сопротивления в формате *.d2d, готовые к дальнейшей обработке в удобном программном пакете обработки электрометрических данных.

Георадиолокационное профилирование

Георадиолокационное профилирование – современный геофизический метод, позволяющий получить информацию о характере залегания, внутренних границах и текстурах, мощности отложений верхней части геологического разреза на суше. Принцип действия георадара основан на излучении коротких электромагнитных широкополосных импульсов и приеме отраженных электромагнитных волн различной амплитуды от границ геологических слоев, строительных конструкций и отдельных объектов в грунте, а также водоносных горизонтов, на которых скачкообразно изменяется скорость распространения электромагнитных волн. Основной величиной, фиксируемой при проведении георадарных работ, является время пробега электромагнитной волны (в наносекундах) от передающей антенны к отражающему или дифрагирующему объекту и обратно к приемной антенне [Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014; Буданов и др., 2018].

Георадиолокационное профилирование выполнялось для установления приповерхностного строения побережья и доступных для фиксации нарушений структуры разреза. Основной задачей, решавшейся с применением данного метода, было установление мощности песчаных отложений пляжей и положения кровли ледниковых отложений (морены).

Профилирование выполнялось с использованием георадара марки SIR System-2000 производства фирмы GSSI (США) (рис. 2.22). В ходе работ использовалась приемо-передающая дипольная антенна с центральной частотой излучения 400 Мгц, глубина зондирования составляла 5-7 м. Блоки излучения и приема осуществляли формирование зондирующего импульса на излучающей антенне, прием сигналов с приемной антенны, обработку, запись на жесткий диск компьютера и визуализацию на экране монитора. Всем процессом зондирования с регулируемыми параметрами задержки сигнала, интервала времени регистрации, коэффициента усиления, программируемого во времени усиления, фильтрации и т.д. управляет встроенный компьютер с помощью соответствующей программы сбора и хранения информации [Амантов, Буданов, Григорьев и др., 2014; Буданов и др., 2018]. Съемка осуществлялась посредством непрерывного перемещения антенны георадара по исследуемой поверхности со скоростью до 5 км/ч, шаг зондирования составлял 5 см.





Рисунок 2.22. Георадиолокационное профилирование (георадар SIR-2000 производства фирмы GSSI (США)).

Георадилокационное профилирование в субаэральной части береговой зоны Нарвского залива, Курортного района, на южном берегу залива между пос. Лебяжье и Большая Ижора и западного побережья о-ва Котлин было выполнено под руководством и при непосредственном участии автора работы в 2012-2018 гг. Общий объем работ составил более 30 км. Было исследовано 15 ключевых участков, что позволило получить полное представление о строении верхней части геологического разреза всех наиболее характерных сегментов береговой зоны [Сергеев, Буданов, Рябчук и др., 2019].

Гравиразведочные исследования

Для изучения глубин недоступных методам ЭТ и георадиолокации применялась гравизразведочная съемка. По данным многочисленных скважин [Дашко и др., 2011], рыхлые четвертичные отложения, выполняющие врезы палеодолин, имеют меньшую по сравнению с коренными отложениями плотность. Плотность отложений ледниковых, межледниковых и послеледниковых комплексов изменяется от 1.76 до 2.27 г/см³, а вендских глин, поверхность которых осложнена врезами, от 2.67 до 2.76 г/см³. Мощность четвертичной толщи вне палеодолин изменяется незначительно и варьирует от 20 до 45 м, а в тальвегах погребенных долин достигает до 150 м. Увеличение мощности разуплотненных пород создает отрицательные аномалии в гравитационном поле. Дочетвертичные отложения имеют субгоризонтальную слоистость, которая не создает аномалий поля силы тяжести, однако в основании палеодолин могут располагаться тектонически ослабленные породы [Ауслендер и др., 2002; Ядута, 2006; Дашко и др. 2011], над которыми также должны фиксироваться отрицательные гравитационные аномалии. Успешное применение высокоточной гравиразведки в исследованиях, направленных на изучение палеодолин, подтверждает эффективность метода не только при локализации врезов, но и в уточнении характера их заполнения [Малов, 1999; Rumpel et al., 2006].

Для оценки информативности метода при изучении палеодолин было выполнено моделирование в программе Oasis Montaj. По априорным данным были построены плотностные разрезы, для которых были рассчитаны аномалии поля силы тяжести (рис.2.23). Сеть наблюдений, используемая при моделировании, была выбрана как при съемке масштаба 1:25 000 [Инструкция по гравиметрической разведке, 1975]. Такой выбор был обусловлен геометрическими размерами изучаемого объекта глубина вреза в дочетвертичных породах до 100 м при ширине до 1-2 км. Длина линии модельных наблюдений составила 3 км, с шагом 50 м.



Рисунок 2.23. Априорная физико-геологическая модель и гравитационное поле, рассчитанное по модели погребенной долины в программе Oasis Montaj 7. Обозначения: 1 – суглинки (гляциальные) – ρ - 2,02-2,27 г/см³, 2 – суглинки/глины – ρ - 1,90-2,00 г/см³, 3 – пески/супеси – ρ - 1,70-1,95 г/см³, 4 – глины – ρ - 2,17-2,26 г/см³, 5 – песчаник – ρ - 2,25-2,60 г/см³.

Гравиметрическая съемка выполнялась с использованием современного автоматического микропроцессорного гравиметра CG-5 Autograv (Scintrex Ltd, Kaнaдa), по вдольбереговым профилям (рис. 2.24). Расположение точек наблюдения на профиле параллельном береговой линии в пределах пляжа, на котором отсутствуют значительные перепады высот, позволило минимизировать влияние окружающего рельефа на регистрируемые данные. Шаг наблюдений составлял 50 метров в центральной части профиля (над предполагаемым расположением тальвега и склоновых участков погребенной долины) и 100 метров на его периферии.

Съемка и подготовка оборудования к работе проводились в соответствии с инструкцией [CG-5 Manual, 2012]. На рядовом гравиметрическом пункте наблюдения производилось три цикла измерений продолжительностью по 30 секунд, фиксировалась высота основания гравиметра над поверхностью земли, а также для контроля качества регистрируемых данных – одно случайное значение ускорения силы тяжести и стандартное отклонение, выводимые на дисплей в процессе съемки. В случае, если ошибка превышала 0.1 мГл, циклы съемки производились повторно, до тех пор, пока не получалось три цикла с удовлетворительным значением.



Рисунок 2.24. Схема мощности четвертичных образований Санкт-Петербурга (а). Схема распространения палеодолин в пределах Санкт-Петербурга (b)[Геологический атлас Санкт-Петербурга, 2009] и профиль гравиметрических наблюдений (с).

При выполнении гравиметрической съемки для каждого профиля выбирался опорный гравиметрический пункт (ОГП), положение которого фиксировалось на фотокамеру, а также на местности отмечалось аэрозольной краской положение особых точек измерительного прибора, для более точного восстановления его положения в пространстве при повторных измерениях (рис. 2.25). Каждый маршрут, длительность которого не должна превышать двух часов, начинался и заканчивался измерениями на ОГП.



Рисунок 2.25. Гравиметр CG-5 Autograv на ОГП.

Топогеодезическое обеспечение (привязка точек наблюдений) осуществлялось с использованием GPS-ГЛОНАС навигатора Garmin, а изменение рельефа на профиле съемки фиксировалось нивелирной съемкой.

Методы сейсморазведки

Для уточнения структурных особенностей, выявленных по результатам гравиразведочной съемки объектов, была применена сейсморазведка методом отраженных волн. По имеющимся геологическим данным известно, что отложения, которыми выполнены погребенные врезы, и вмещающие их толщи характеризуются разными плотностями [Дашко и др., 2011] и скоростями распространения продольных и поперечных волн [Алешин, 2010], причем как скорости, так и плотности в первых ниже, чем во вторых. Такие условия являются благоприятными для возникновения отраженных и преломленных волн, что подтверждается опытными работами на аналогичных объектах [Наппа-Maria Rumpel, 2006].

Для оценки возможностей сейсморазведки при изучении палеодолин региона, выбора оптимальных параметров системы наблюдений, а также оценки уровня сигнала и разрешающей способности метода было выполнено имитационное моделирование в программе Tesserael. Сейсмическим комплексам, входящим в модель, были присвоены средние скорости продольных и поперечных волны по справочным данным [Алешин, 2010] и плотности по данным бурения [Ауслендер, 2001; Дашко, 2011] (рис. 2.26).

Моделирование было выполнено с различными системами наблюдения. Центральная частота зондирующего сигнала составила 75 Гц, как средняя для источника – кувалда, форма импульса – минимально фазовая. В работе было использовано моделирование на основе конечноразностного решения упругого волнового уравнения, создающего наиболее близкую аппроксимацию к реальным условиям твердой среды, включая эффекты обмена и волны сдвига (поперечные). Этот вид моделирования учитывает не только распределение в среде скорости волн сжатия и плотности, но требует также знания (по крайней мере, оценки) соответствующей скорости волн сдвига. Результаты моделирования сохранялись в формате .segy для дальнейшего анализа. На синтетических сейсмограммах отчетливо прослеживаются полезные отражения.

Для синтетических сейсмограмм была выполнена обработка в программе RadexPro, получены сейсмические разрезы (рис. 2.27). Результаты моделирования подтверждают возможность применения сейсморазведки для изучения палеодолин. На модельных разрезах надежно коррелируются отражения как на границе четвертичных и дочетвертичных отложений, так и внутри четвертичной толщи.



Рисунок 2.26. Сейсмогеологическая модель строения погребенного вреза, используемая для выполнения имитационного моделирования в программе Tesseral.



Рисунок 2.27. Синтетический временной разрез, полученный в результате обработки результатов имитационного моделирования в программе RadexPro.

В качестве эксперимента, а также для получения новой геофизической информации о палеодолинах, были выполнены опытно-методические работы. Наблюдения производились по вдольбереговому профилю с незначительными (не более 1 метра) перепадами рельефа.

При проведении полевых работ применялась облегченная телеметрическая сейсмическая станция ТЕЛСС – 3. Составляющими станции являются: четырехканальные цифровые модули, соединяемые последовательно кабельными секциями в линию приема (косы), интерфейсный модуль, подключаемый к ноутбуку оператора по USB – кабелю. К каждой кабельной секции

подсоединяются по 4 сейсмоприемника. Для регистрации продольных волн использовались «вертикальные» сейсмоприемники. В качестве устройства возбуждения сейсмических волн применялся поверхностный источник – кувалда, которой производились удары по размещенному на поверхности земли металлическому блину.

По результатам моделирования была выбрана система центральных наблюдений с шагом между приемниками (ПП) 2 метра, а между источниками (ПВ) 4 метра. Данная расстановка наиболее практична в использовании, так как экономит время при достаточном наборе кратности для дальнейшей обработки и интерпретации данных. Во время съемки использовался конвейерный перенос косы с одним полевым модулем, который, с учетом ПП и ПВ, происходил, через каждые два «взрыва» (рис. 2.28) [Горелик Г.Д., Буданов Л.М., 2019].



Рисунок 2.28. Схема наблюдений и переноса кос.

Неглубокое бурение

Для подтверждения геофизических данных в пределах заложенных профилей георадиолокации на всех полигонах было проведено бурение при помощи бензобура STIHL BT 121 со шнековым почвенным буром и двумя удлинителями штока. Оборудование позволяет бурить скважины диаметром 12 см и глубиной до 2 м. На подготовительном этапе работ снимался верхний слой почвы размером 40 х 40 см и глубиной до 30-40 см. Образцы грунтов отбирались со шнека бура. Суммарно на всех участках исследования было для заверки геофизических данных было пробурено более 150 скважин.

2.2. Методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований

2.2.1. Методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований дна акватории

Методика обработки и интерпретация полевых материалов (НСП)

Цифровая обработка данных сейсмоакустических наблюдений на акваториях заключается в получении качественных временных разрезов, на которых можно визуально выделить отражающие границы. Для достижения этого необходимо максимально повысить соотношение сигнал/помеха (соответственно, глубинность метода) и разрешающую способность сейсмической записи. Основные приемы, используемые при этом – прежде всего, это различные виды линейной частотной фильтрации: полосовая, оптимальная, обратная; винеровские линейные фильтры и разнообразные виды обработки, применяемые с целью подавления многократных волн. [Старовойтов, 2010].

Для обработки сейсмоакустических данных применяется программа RadExPro (ООО «Декогеофизика СК», Россия). Система имеет все необходимые инструменты для полнофункциональной обработки данных наземной и морской сейсморазведки 2D, а также специализированный модуль обработки морских данных, направленный на подавление волн-спутников на одноканальных или суммированных данных, полученных при небольших выносах источник-приемник [Руководство пользователя RadExPro, 2016].

Интерпретация обработанных сейсмограмм также осуществляется в программе RadExPro. Записи визуализируются в удобном для интерпретатора формате, протяженные оси синфазности и границы изменения инфраструктуры записей трассируются для дальнейшего экспорта и анализа в геоинформационных системах.

В основе геофизической интерпретации сейсмоакустических записей лежит выделение акустических комплексов. Границы выделяемых на записи зон могут быть представлены протяженными осями синфазности или границами, на которых изменяется инфраструктура записи.

Оценка информативности метода

На мелководных акваториях целесообразно применение одноканальных сейсмоакустических наблюдений. Эта методика обладает высокой разрешающей способностью, как по вертикали, так и по горизонтали, и позволяет с большой детальностью изучать геометрию поддонных границ и характер внутреннего строения отложений.

Разные типы донных осадков существенно отличаются друг от друга по акустическим свойствам и на литологических контактах дают резкие скачки физических параметров. В геологических колонках таким скачкам нередко соответствуют поверхности размыва, изменение

вещественного (или гранулометрического) состава, а на сейсмоакустических разрезах - сильные рефлекторы, поверхности размыва и углового несогласия.

Для отдельных типов донных осадков или фациально-литологических комплексов свойствен рисунок отражений, что позволяет почти однозначно определенный выделять ИХ на сейсмоакустических разрезах (рис. 2.29). Так, морены на этих разрезах обычно вырисовываются в виде линз или пластовых тел с хаотическим или чешуйчатым рисунком отражений. В рельефе дна они часто образуют возвышенности с расчлененной поверхностью. У кровли и подошвы морен регистрируются поверхности углового несогласия и сильные рефлекторы, обрисовывающие морены на фоне подстилающих и покрывающих слоистых толщ. Для ленточных глин характерна ярко выраженная слоистость, облекающий характер слоев с выдержанной по латерали мощностью. Они записываются в виде отдельных пачек с характерным только для них рисунком отражений. При этом микроленточные глины на низких частотах могут выглядеть как "гомогенные" толщи и лишь на высоких частотах обнаруживают акустическую стратификацию. Гомогенные глины на всех частотах выделяются как осветленные слои. В виде осветленных толщ с неясно выраженной слоистостью записываются также илы. Слабые отражения от илистого дна объясняются газонасыщенностью верхнего слоя осадков. Алевриты чаще всего выделяются как акустически полупрозрачный (или прозрачный) слой с достаточно сильными отражениями от дна. Пески, сглаживая дно, образуют сильные отражающие поверхности, которые экранируют подстилающие толщи. Очень сильным акустическим экраном с рассеивающей поверхностью дна являются гравийно-галечные и валунные скопления [Емельянов, Гуделис, 1976].



Рисунок 2.29. Пример сейсмоакустического разреза с геологической интерпретацией: I – нерасчлененные водно-ледниковые и морские отложения, II – ледниковые отложения (морена), III – коренные породы, VI – водная толща.

Для изучения палеодолин, учитывая мощность погребенных врезов региона, НСП обеспечивает достаточную глубинность исследований при глубине моря 10 и более метров, при работе на меньших глубинах интенсивность помех и их положение в разрезе не позволяет эффективно их подавлять, что осложняет интерпретацию сейсмограмм, или делает ее вовсе

невозможной. Палеодолины на сейсмоакустических профилях можно идентифицировать по увеличению мощности четверичных отложений, понижению кровли коренных пород, особенностям внутренней структуры записи, отражающей строение выполняющих врез отложений, и латеральным изменениям отражений от границ геологических комплексов.

Методика обработки и интерпретация полевых материалов НАЗ

Первичная обработка данных НАЗ осуществлялась в программе «Octopus Pro» (ООО "Северо-Запад", Россия). Непрерывная запись, учитывая данные калибровки, усредняется с заданным шагом по времени. Шаг в 1 секунду был выбран для удобства синхронизации с навигационными данными и, учитывая скорость буксировки, обеспечивал перенос расстановки в 1-2 метра. В результате получается таблица, содержащая информацию о зарегистрированном на каждом канале напряжении для каждой единицы времени.

Привязка установки осуществлялась путем синхронизации времени навигационной привязки судна и данных НАЗ. В координаты, снятые во время работы, вводилась поправка за вынос косы, это позволило рассчитать расстояние от начала профиля до центра каждой расстановки. С использованием Surfer (Golden Software, США) данные были сглажены по горизонтали и разряжены так, чтобы перенос расстановок составлял 5 метров, а значения измеренных напряжений с учетом коэффициентов расстановок силы тока питающей линии были пересчитаны в кажущиеся сопротивления и записаны в таблицу, содержащую информацию об измеренном кажущемся сопротивлении на каждом канале и пройденном по профилю расстоянии.

Записанные эхолотные данные были также приведены к линейному масштабу. Профиль дна был вручную оцифрован по точкам излома кривой. В результате получена таблица содержащая расстояние от начала профиля и глубину в этой точке.

Данные резистивиметрии были пересчитаны в значения УЭС воды и также привязаны к удалению от начала профиля. Водный слой по точкам излома рельефа дна был разбит на фигуры простой формы (треугольники и четырехугольники), которым было присвоено среднее значение всех измеренных УЭС воды, попавших на отрезок профиля, где этот фрагмент расположен. Координаты углов простых фигур (расстояние по профилю и глубина) и среднее значение УЭС воды были сохранены в табличном виде, что позволит при инверсии закрепить этот слой.

Электрическая томография основана на сочетании возможностей методов ЭП и ВЭЗ. Главным преимуществом ЭТ является возможность изучения сложных геологических разрезов, в которых границы, разделяющие породы, могут быть любой конфигурации, а УЭС слоев, зависящее от состава и состояния пород, изменяется по латерали. Эти возможности реализуются за счет использования двумерной интерпретационной модели для решения обратной физикоматематической задачи ЭТ. В качестве модели используется сеточная модель, ячейки которой имеют прямоугольную форму. Процесс решения обратной задачи называют инверсией полевых данных. В результате инверсии определяются значения УЭС каждой ячейки. Получаемый двумерный инверсионный геоэлектрический разрез отражает геологическое строение, литологический состав и состояние пород. Процесс инверсии сводится к подбору такого геоэлектрического разреза, теоретический разрез КУЭС от которого наилучшим образом совпадает с наблюдаемым [СП 11-105-97, 2004].

Инверсия данных НАЗ производилась с использованием программы Res2dinv. Сведения о геометрии расстановки, измеренных значениях кажущегося сопротивления и данные о геометрии и сопротивлении водного слоя были внесены в единую таблицу. Формирование файла для дальнейшей инверсии производилось в соответствии с инструкцией к Res2dInv [Loke, 2017].

Инверсия производилась методом наименьших квадратов с ограничением гладкости. Число итераций составляло 5, но для дальнейшей интерпретации использовались результаты третей итерации, значение среднеквадратической ошибки (различие значений кажущегося сопротивления, рассчитанного и измеренного) не превышало 5%. В результате инверсии данных получены 2D геоэлектрические разрезы, характеризующие распределение УЭС по профилям геофизической съемки до глубины 40 м (рис. 2.30) [Буданов Л.М. и др, 2017].



Рисунок 2.30. Пример геоэлектрического разреза, инверсия выполнена в Res2dInv.

Оценка информативности метода

Качественный анализ результатов моделирования и натурных наблюдений показал, что высокоомная аномалия, вызванная повышенным сопротивлением четвертичных отложений, выполняющих врез долины, по сравнению с коренными глинами, уверенно фиксируется методом сопротивлений. Контрастность аномалии может варьировать и зависит от состава отложений и минерализации грунтовых вод. В пределах высокоомной аномалии выделяются локальные неоднородности, которые отражают особенности внутреннего строения палеодолин. Для точной интерпретации этих аномалий необходимы данные бурения.

Метод в силу зависимости глубинности исследований от величины разноса не позволяет получать информацию о разрезе глубже 40 метров от поверхности воды, при использовании косы длиной 200 метров. Однако, как показала практика, из-за большого переходного сопротивления на контактах электрод-вода и высоком уровне помех (связанных с близостью города, а также высокой техногенной нагрузкой акватории Невской губы) увеличение разноса не позволит увеличить глубину исследований, так как уровень сигнала будет ниже помех.

Метод НАЗ позволяет исследовать погребенные долины на акваториях с глубинами от 0 до 10-20 метров, на больших глубинах значительную часть разреза будет занимать водный слой, а дочетвертичные отложения могут оказаться ниже глубины зондирования – увеличение мощности высокоомной четвертичной толщи будет невозможно зафиксировать.

Методика обработки и интерпретация полевых материалов ГЛБО

Камеральная обработка и предварительная интерпретация данных сонарного профилирования производилась с помощью пакета программ фирмы "Octopus marine system Ltd". Отдельные галсы сводились в единую сетку профилей для получения площадной акустической картины поверхности дна, представляющей собой мозаику растровых данных. В свою очередь полученная мозаика экспортировалась в ГИС. Растровые данные мозаики ГЛБО представляют собой монохромное изображение, на котором интенсивность тона зависит от величины отраженного сигнала акустического импульса от граней рельефа и коэффициентов отражения от поверхностей геологических образований, а такжеи техногенных объектов [Erlingsson, 1990].

Следующим шагом являлась интерпретация географически привязанных растровых данных с использованием пакета программ ArcGIS 10.1^{тм}. Выделение определенных типов структур и донных отложений осуществлялось с использованием Атласа аннотированных сонограмм [Рыбалко и др., 1989] и данных заверочного пробоотбора.

2.3.2. Методика обработки и интерпретации результатов геолого-геофизических исследований субаэральной части береговой зоны и прибрежной суши

Методика обработки и интерпретация полевых материалов, полученных методом электротомографии

Целью обработки и интерпретации данных ЭТ является минимизация влияния помех и восстановление особенностей распределения электрических свойств в исследуемом разрезе. Инверсия данных ЭТ производилась с использованием программы Res2dinv. Инверсия в соответствии с результатами моделирования, выполнялась методом наименьших квадратов с ограничением гладкости. Число итераций составляло 5, но для дальнейшей интерпретации использовались результаты второй или третей итерации, значение среднеквадратической ошибки (различие значений кажущегося сопротивления, рассчитанного и измеренного) не превышало 5%. В результате инверсии данных получены 2D геоэлектрические разрезы, характеризующие распределение УЭС по профилям геофизической съемки до глубины около 44 м (рис.2.31).



Рисунок 2.31. Пример геоэлектрического разреза, инверсия выполнена в Res2dInv.

Оценка геологической информативности метода

Интерпретация данных ЭТ в рамках исследований палеодолин сводится к локализации долины, оценке морфологии элементов вреза (склонов, тальвега и террас) и выявлению неоднородностей в отложениях его выполняющих. Условия съемки в пределах береговой зоны можно отнести к неблагоприятным. Так, наличие слоя сухого песка на территории пляжа приводит к сложностям при заземлении электродов и множественным мелким аномалиям высокого сопротивления в верхней части псевдоразреза кажущихся сопротивлений (Р-эффект), которые при инверсии влияют на весь геоэлектрический разрез и приводят к формированию вертикальных аномалий, несвязанных с особенностями геологического старения исследуемой среды [Бобачев и др., 1996].

Для борьбы с описанным эффектом в случае работ методом ВЭЗ применяют нормализацию кривых зондирования [Бобачев и др., 1996]. Данные полученные методом ЭТ с использованной геометрией расстановок можно представить в виде набора кривых ВЭЗ и произвести нормализацию измеренных значений. Ввиду большого количества точек измерений данная операция существенно увеличивает время обработки полевых материалов, а ее результат не всегда можно считать удовлетворительным, так как после обработки и инверсии некоторые артефакты все равно остаются.

Ha результирующих геоэлектрических разрезах можно условно выделить три геоэлектрических комплекса: верхний соответствует сухим пескам, средний, соответствующий ледниковым и межледниковым отложениям и нижний, соответствующий дочетвертичной толще. Первый комплекс выдержанный, мощностью несколько метров. Второй фиксируется как чашеобразная аномалия, отражающая увеличение мощности рыхлых отложений в центральной части палеодолины, которая соответствует положению долины, а ее форма в некотором приближении отображает морфологию вреза. В пределах аномалии зафиксированы локальные зоны повышения и понижения сопротивления, которые, по-видимому, отражают особенности внутреннего строения палеодолины. На периферии и вне вреза в нижней части разреза фиксируются третий комплекс.

Методика обработки и интерпретации георадиолокации

Обработка данных георадиолокации проводится с помощью программного пакета РАДАН. В результате перебора различных процедур и видов обработки полученной информации проводится редактирование, дистанционная нормализация, поверхностная (топографическая) нормализация (по данным нивелировок), миграция, фильтрация. Выбор скорости прохождения электромагнитных волн по разрезу, необходимой для перестройки вертикального масштаба профилей из временного (наносекундного) в глубинный (метры), проводился с помощью соответствующих программных процедур обработки георадиолокационного разреза (миграция разреза по форме гипербол). В результате такой обработки по профилям строится геофизический разрез для дальнейшей интерпретации.

Георадиолокационное профилирование в исследуемом регионе сталкивается с некоторыми неблагоприятными условиями. Глинистые отложения являются экраном для георадиолокации, что обусловлено их сравнительно высокой проводимостью, которая приводит к значительным потерям энергии зондирующего сигнала и, как правило, отражений ниже глин либо не регистрируется, либо их амплитуды сравнимы с уровнем шумов. Для существенно песчанистых разрезов потери зондирующего импульса на затухание значительно ниже – глубинность исследований повышается. Интерпретация георадарных записей заключается в выделении комплексов отложений, различающихся структурными особенностями внутренних отражающих горизонтов: направленностью залегания слоев, интенсивностью отражения, прозрачностью, однородностью и

др. Границы между комплексами проводятся по явным, хорошо читаемым осям синфазности, изменению однородности разреза либо по явным структурным несогласиям между комплексами. При интерпретации учитываются разности в скорости прохождения сигналом разных сред, наличие грунтовых вод и искажения горизонтов при введении данных о рельефе.

Анализ структурных особенностей комплексов и их стратиграфического положения в разрезе позволяет с достаточной уверенностью и высокой точностью определить фациальную и генетическую принадлежность комплекса отложений и установить особенности среды седиментации.

Оценка информативности метода

Использование георадиолокационного метода при изучении прибрежно-морских И флювиогляциальных отложений, широко развитых на территории Санкт-Петербурга И Ленинградской области, показало высокую эффективность. Анализ и интерпретация геофизического разреза, в совокупности с геоморфологическим анализом форм рельефа, позволяет: фациальные условия существенно детализировать И расчленить прибрежные границ палеоводоемов; установить погребенные под эоловыми и делювиальными отложениями реликтовые береговые линии; проследить эрозионные горизонты, отражающие этапы развития постледниковых палеоводоемов Балтийского моря.

Применение георадарных антенн разных частот для изучения приповерхностного разреза четвертичных отложений восточной части Финского залива показало следующее. Для водноледниковых отложений региона, предпочтительно применение низкочастотных антенн с центральной частотой 70 МГц, что позволят получить отражения с больших глубин, и обеспечивает достаточную читаемость внутренних потоковых структур. На прибрежно-морских аккумулятивных равнинах, где широко развиты береговые формы рельефа, предпочтительно использование антенн средневысоких частот (400 и 200 МГц), которые позволяют достаточно детально расчленить фациальную изменчивость прибрежных отложений. Для исследований на дюнах использование антенн средневысоких частот показало низкую информативность. Поэтому для эоловых образований предпочтительнее использование низкочастотных антенн.

Методика обработки и интерпретация полевых материалов, полученных методом гравиразведки

Обработка полевых данных выполнялась с использованием программного продукта Oasis Montaj, в котором реализованы выражения, описанные в инструкции по гравиметрической разведке [Инструкция по гравиметрической разведке, 1975]. Для интерпретации полученных данных было

использовано два метода (рис.2.32): аналитического продолжения геофизических полей методом цепных дробей [Ермохин, 2009] и ручной подбор модели плотностного разреза, решение прямой задачи для которого наилучшим образом совпадает с наблюденной кривой. Для достижения минимальных различий между кривыми применяется изменение мощностей слоев модели, значения плотностей слоев и их количества в модели.



Рисунок 2.32. Результаты интерпретации наблюденного поля силы тяжести. А - методом подбора 1 – экспериментальные данные, 2 – рассчитанное поле по подобранной модели среды, 3 – разница экспериментальных и расчетного поля; Б – методом цепных дробей.

Оценка информативности метода

Применение гравиразведки позволяет установить наличие неоднородности в разрезе. Над палеодолинами в Санкт-Петербурге характерно наличие локальной отрицательной аномалии гравитационного поля, вызванное увеличением мощности рыхлых четвертичных отложений, которые обладают пониженной по сравнению с коренными породами плотностью. Ширина и величина аномалии позволяют на качественном уровне оценить размеры погребенных долин, а учитывая незначительные отличия в крутизне склонов врезов также оценивать и мощность четвертичных отложений, как в тальвеге долины, так и в ее окрестностях.

Особенности геологического строения четвертичного разреза уточнить по данным гравиметрии, без привлечения дополнительной геологической или геофизической информации, не представляется возможным. Залегание слоев отложений, выполняющих палеодолину, носит преимущественно хаотический характер, и их взаиморасположение мало влияет на особенности регистрируемых значений поля силы тяжести. Однако закрепление горизонтов и свойств на основании другой геолого-геофизической информации позволяет повысить точность восстановления плотностного разреза и частично расчленить четвертичную толщу.

Методика обработки и интерпретации полевых материалов сейсморазведки

Цифровая обработка инженерных сейсмических данных выполнена на ВЦ Горного университета в период с ноября 2017 г. по март 2018 г. с использованием обрабатывающего пакета RadExPro. Для выбора оптимальных параметров обработки выполнялось тестирование параметров. Основные направления тестирования заключались в подавлении низкоскоростных волн-помех и пространственных «зеркальных» частот и линейных помех.

После тестирования была определена последовательность процедур обработки:

1) ввод геометрии; 2) ввод данных в программу RadExPro; 3) редактирование; 4) предсказывающая деконволюция; 5) коррекция амплитуд; 6) полосовая фильтрация с использованием простого трапециевидного полосового фильтра; 7) скоростной анализ проводился дискретно с шагом по линии профиля 100 м с созданием суперсейсмограмм (рис. 2.34); 8) предварительное суммирование трасс; 9) горизонтальный скоростной анализ проводился после суммирования для определения и уточнения горизонтального скоростного закона вдоль заданных горизонтов, которые пикировались на суммированном разрезе; 10) финальное суммирование также производилось в режиме сохраненных амплитуд по общим средним точкам (рис. 2.35).



Рисунок 2.33. Ввод геометрии системы наблюдения через программу Geogiga Front End.



Рисунок 2.34. Интерактивный скоростной анализ с помощью модуля IVA.



Рисунок 2.35. Временной разрез, полученный в результате обработки полевых данных [Горелик Г.Д. и Буданов Л.М., 2019]

Оценка информативности метода

Изменения акустических свойств отложений четвертичной толщи, мощность которой в пределах долин достигает сотен метров, незначительны и носят хаотичный характер, что осложняет получение достоверной информации об особенностях ее строения. Также к осложняющим можно отнести условия сейсмических наблюдений (возбуждения и регистрации волн) в пределах береговой зоны. Высокий уровень антропогенной нагрузки приводит к возникновению волн помех, а преимущественно рыхлые аэрированные отложения на поверхности приводят к ослаблению, как возбуждаемых сигналов, так и регистрируемых.

2.2.3. Методический подход к совместной интерпретации геофизической информации, полученной различными методами в пределах дна акватории, береговой зоны и приморских территорий

Применение методов, основанных на различных физических явлениях, позволяет получить наиболее полную картину строения геологического разреза, в том числе в пределах дна акватории, береговой зоны и погребенных долин.

Для повышения достоверности геологической информации, получаемой акваторными геофизическими методами целесообразно применять совместную интерпретацию полевых материалов. Сейсмоакустические исследования позволяют устанавливать рельеф дна, геометрию границ поддонных отложений и морфологию погребенных врезов. Использование одноканальной модификации НСП не позволяет получить данные об упругих свойствах отложений. Границы сейсмоакустических комплексов, выделяемых в пределах исследуемого региона, обусловлены в основном изменением глинистости отложений, которая, в свою очередь, также является одной из основных причин изменения УЭС отложений. При этом в изменения минерализации грунтовых вод песчаных отложений различных горизонтов никак не отображается на сейсмограммах, тогда как существенно изменяет сопротивление изучаемой среды.

По данным методов электроразведки, ввиду малого контраста геоэлектрических свойств четвертичных отложений, границы в верхней части разреза практически не фиксируются, при этом существенный контраст их контакта с вендскими глинами позволяет оценивать геометрию кровли дочетвертичных отложений. В случае наличия дополнительной информации о геометрии слоев верхней части разреза электротомография позволяет восстанавливать значения сопротивлений исследуемых геологических сред.

При проведении съемки методами НСП и НАЗ по единой системе профилей возможно применение комплексной обработки и интерпретации полученных данных. Геометрию отражающих границ, фиксируемую на сейсмограммах, можно закреплять на геоэлектрической модели, повышая тем самым достоверность инверсии (рис 2.36).



Рисунок 2.36. Разрезы УЭС: верхний – без закрепления границ, средний – с закрепленным слоем воды (по данным эхолотирования и резистивиметрии), нижний – с закрепленными водным слоем и нижней частью разреза (дочетвертичные отложения, по данным сейсмоакустики).

Из приведенных иллюстраций видно, что закрепление свойств водной толщи при инверсии незначительно влияет на ее результат. Закрепление же свойств поддоных отложений позволяет с большей точностью восстанавливать распределение электрических свойств в разрезе, границы геоэлектрических комплексов, за счет более строгого описания начальных условий инверсии. Таким образом, можно не только детектировать погребенный врез, но и выделить в его пределах геоэлектрические комплексы, отражающие положение слоев различного литологического состава и минерализации грунтовых вод.

Однако следует также отметить, что подобное комплексирование возможно только в условиях, когда глубина воды достаточна для получения качественной информации методом НСП (10 м и более), при этом не превышает глубинность исследований методом НАЗ (менее 30 м, при использовании предлагаемой методики наблюдений), то есть на акваториях с глубинами 10-30 м. На больших глубинах наблюдения методом НАЗ не позволят получить информацию о геологическом строении донных отложений (недостаточная глубина зондирования), НСП же на сугубых мелководьях позволит получить лишь информацию о поверхностных отложениях из-за высокоинтенсивной реверберации, устранение которой программными средствами в таких условиях не позволит существенно увеличить глубинность исследований.

Работа в береговой зоне Финского залива сопряжена с такими сложностями, как высокий уровень помех, сложные условия возбуждения и регистрации геофизических полей, а также значительная изменчивость верхней части геологического разреза в силу его преимущественно ледникового происхождения.
Для оценки мощности ослабленных пород (послеледниковых) в береговой зоне восточной части Финского залива, что является принципиально важным с точки зрения получения достоверной информации об объемах инертного материала в береговой зоне, прогнозировании развития абразионных процессов в будущем и выборе стратегии берегозащиты, зачастую достаточно применения георадиолокации, заверенной неглубоким бурением (рис.2.37).



Рисунок 2.37. Пример радарограммы, полученной в Курортном районе Санкт-Петербурга, с нанесенными колонками скважин.

В то же время, из-за невысокой глубинности исследований (первые десятки метров в случае благоприятного разреза) и экранирующих свойств ледниковых отложений (устойчивое основание), обусловленных высоким содержанием глинистых частиц, эти исследования не достаточны для локализации и уточнения внутреннего строения палеодолин, распространенных в регионе.

Высокоточная гравиразведка как один из наименее трудозатратных среди оставшихся представленных методов, позволяет по локальному минимуму обнаружить врез и положение его тальвега, тем самым сократить площадь исследований другими методами, входящими в предлагаемый комплекс. Преимуществом этого метода является еще и то, что для локализации вреза достаточно выполнить первичную обработку данных, по результатам которой возможно локализовать врез. Как показала практика, действительное положение вреза и изображение его на имеющихся картах незначительно расходится (достигает значений около 500 м), это вызвано особенностями расположения скважин, по которым они построены. Такая погрешность приемлема для картирования в масштабе 1:200000, однако для проведения инженерно-геофизических изысканий, когда указанная погрешность слишком велика, применение высокоточной гравиразведки является необходимым.

После локализации вреза следует применять методы сейсморазведки (рис. 2.38) и электроразведки. Последовательность на этом этапе играет не столь важную роль, но применение



обоих групп методов позволит не только значительно уточнить морфологию вреза и геометрию границ отложений, но и произвести типизацию врезов.

Рисунок 2.38. Результат гравитационного моделирования по изученному профилю. Верхняя панель: точки-измеренные значения, черная линия – подобранное (модельное) поле (поле в редукции Буге с условным уровнем). Нижняя панель: двумерная плотностная модель. Внизу справа – в виде врезки – фрагмент разреза, полученного по данным сейсморазведки в сопоставлении с границами плотностных блоков. Растяжение по вертикали в 2.5 раза

Одной из методических задач, решавшихся в рамках данной работы, была увязка, корреляция и интерпретация данных, выполненных по единому геофизическому профилю в пределах суши и акватории. Задача была решена в процессе изучения палеодолин. На суше в пределах территории Санкт-Петербурга изученность системы погребенных врезов находится на высоком уровне. Основным источником информации служат прямые геологические наблюдения (скважины), геофизических же материалов в открытом доступе недостаточно. На акватории фактические данные о погребенной сети имеются только для районов створов КЗС и западнее острова Котлин, основным источником являются данные сейсмоакустических исследований.

Как было показано выше, условия возбуждения и регистрации геофизических полей существенно отличаются на акватории и на суше, однако корреляция данных полученных на основе одинаковых физических явлений обеспечат корреляцию единообразных геологических тел и структур.

Проведение геофизических работ в приурезовой части береговой зоны позволяет получить информацию, геологическая интерпретация которой обладает высокой достоверностью ввиду наличия большого числа скважин. Исследования продолжений палеодолин методами, основанными на тех же физических явлениях, обеспечивают сходство регистрируемых данных с материалами, полученными на суше, и позволят осуществлять их интерпретацию по аналогии с береговыми данными (рис. 2.39, 2.40).







Рисунок 2.40. Корреляция данных МОВ ОСТ с нанесенными колонками скважин и НСП.

2.3. Методика создания модели палеоландшафтов дна акватории

2.3.1. Методика создания геоинформационной модели эколого-геологических условий дна акватории

Подготовительным этапом создания модели была работа с архивными данными, полученными отделом региональной геоэкологии и морской геологии ВСЕГЕИ в рамках различных проектов, в основном в ходе геологосъемочных работ 1984–2001 гг. (рис.2.2) Проводилась оцифровка данных с бумажных носителей, пространственная привязка геологической и геофизической информации И совместная геологическая интерпретация. Оцифровка сейсмоакустических записей (лент записей непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП), выполненных с высокочастотным профилографом «ГЛ 7.5» (разработка «ВСЕГЕИ», 1980 г.) и со спаркером, также собственной разработки) заключалась в их сканировании и каталогизации изображений для дальнейшей их интерпретации. Начиная с 2000-го года первичные данные НСП записывались в цифровых форматах. Всего в работе использовано более 8 тыс. км данных геофизического профилирования. Для каждого сейсмоакустического разреза составлялась таблица навигационной привязки, содержащая координаты и время, соответствующие временным маркам, нанесенным во время записи.

Сведения о выделяемых комплексах были занесены в таблицу путем снятия значений времени двойного пробега от поверхности воды до отражающего горизонта, разделяющего акустические комплексы (или являющегося оцифровываемой границей) и рассчитанного времени (методом линейной интерполяции) записи трассы, которое затем позволяло определить географическое положение точки наблюдений.

Снятые значения времени двойного пробега были преобразованы в глубины с допущением, что скорость продольных волн в воде и в верхней части разреза совпадает и составляет 1500 м/с – глубины и мощности дальнейших моделей могут быть незначительно занижены.

Таблицы, содержащие глубинные отметки, были импортированы в геоинформационную систему (ГИС) ArcMap 10.2, и на их основе, с использованием встроенных инструментов программного пакета, были построены цифровые модели поверхностей палеорельефа восточной части Финского залива, рассчитаны мощности отложений ограниченных, построенными поверхностями.

Полученных по результатам анализа буровых скважин точечные данные об абсолютных значениях глубины залегания кровли каждого возрастного подразделения вводились в проект вручную и дополнялись расчетными изолиниями, построенными с учетом морфологии современного рельефа и представлений о геологическом строении района, а также изолиниями контурами современного рельефа на участках их обнажений. Следующим шагом была интерполяция данных для каждой поверхности с использованием инструмента ArcGIS «топо в растр» (Topo to Raster) модуля геопространственного анализа Spatial Analyst, позволяющего строить гидрологически корректные растровые поверхности по точечным, линейным и полигональным данным [Сергеев, 2015]. Вычисление мощности слоя илистых отложений и слоя слабых грунтов (объединенных илистых осадков и глин) проводилось непосредственно при оцифровки архивных сейсмолент, что позволяло с наибольшей степенью детальности получить данные для построения схем.

Созданные пространственные модели поверхностей разных сейсмо-стратиграфических горизонтов были обработаны и проанализированы методами геоанализа. Для построения интегральной схемы геоэкологического районирования были использован следующие методы обработки каждой поверхности. На предварительном этапе производилась сглаживание поверхности методом «Фокальная статистика» (focal statistic). Этот инструмент, позволяет вычислить для каждой входной ячейки статистику значений в определенной вокруг нее окрестности, что при применении к цифровой модели рельефа позволяет сгладить неровности и минимизировать ошибки интерполяции. Геоанализ поверхностей проводился с применением инструментов группы «Benthic Terrain Modeler». Инструменты этой группы используются для классификации батиметрических данных, позволяют вычислять батиметрический индекс позиции (BPI), стандартизировать значения BPI, уклона и неровности (ruggedness) местности. Использование инструментов этой группы применялось для вычисления площадей относительного уклона дна акватории и выделения линейных депрессий в дочетвертичном рельефе, связанных с погребенными палеодолинами. Анализ поверхности дна для районирования геоморфологических условий по степени сложности опирался на результаты геоанализа с использованием «Топографического индекса расчлененности» (Topographic Ruggedness Index), который показывает среднее значение перепада высот между анализируемой ячейкой и смежными с ними, что показывает относительную локальную вертикальную расчлененность рельефа. Для интеграции линейных и точечных данных использовался инструмент группы «плотность», позволяющий вычислить количество точек на единицу площади, которые попадают в область соседства каждой ячейки. Данный метод позволяет оценить площади сгущения выделяемых объектов, и ранжировать их по количеству на квадрантный километр дна, что является составляющей нагрузки показателя геоэкологического потенциала.

2.4. Методика и построения моделей палеоповерхностей рельефа и расчета мощности голоценовых илов

Интерпретация сейсмоакустических разрезов производилась с учетом всей имевшейся геологической информации. При построении среднемасштабных схем по результатам анализа архивных профилей ВСЕГЕИ высокочастотного и низкочастотного НСП (рис.2.41А, Б), по особенностям инфраструктуры записи было выделено три акустических комплекса, соответствующих различным типам отложений.



Рисунок 2.41. Фрагменты архивных сейсмоакустических профилей (профилограф), с выделенным эрозионным горизонтом в голоценовых осадках в локальном седиментационном бассейне: А – запись, отсканированная с бумажного носителя, профилограф - ГЛ-7.5, 1987 год (ВСЕГЕИ); Б – цифровая запись, профилограф - ГЛ-7.5, 2001 год (ВСЕГЕИ); В – цифровая запись, профилограф ЕdgeTech 3300 HM, 2017 год (АО ИО РАН).

В комплексе, интерпретируемом как толща голоценовых осадков, на записях, полученных с применением высокочастотного профилографа, по протяженным субгоризонтальным осям синфазности со сравнительно высокой амплитудой отраженного сигнала были выделены отражающие горизонты, положение которых в пространстве коррелируются с эрозионными горизонтами, выявленными по данным донного пробоотбора (рис.2.41В).

Для расчета мощности голоценовых отложений была построена модель современного рельефа дна Российской части Финского залива. Цифровая модель рельефа (ЦМР) поверхности дна акватории восточной части Финского залива была выполнена на основе изобат и более 16 тысяч точек, оцифрованных с навигационных карт различного масштаба (1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000) (рис 2.42).

Модели палеоповерхностей были построены на всю российскую площадь Финского залива, за исключением Невской губы, для которой, вследствие мелководности и пресноводности имеющиеся данные НСП не позволяют получить достаточно достоверную информацию о границах сейсмоакустических комплексов.

Аналогичный подход был использован при построении моделей палеоповерхностей и расчете мощности голоценовых отложений был применен при картировании ключевых участков в масштабе 1:10 000. В качестве поверхности рельефа была использована ЦМР, построенная по данным многолучевого эхолотирования (рис. 2.43).



Рисунок 2.42. Схема использованных материалов для создания цифровой модели рельефа восточной части Финского залива.



Рисунок 2.43. Модель рельефа двух ключевых участков восточной части Финского залива, построенные по данным многолучевого эхолотирования [Ryabchuk et al., 2018].

Таким образом, в ходе выполнения работы разработан и апробирован оптимальный комплекс современных геолого-геофизических методов геоэкологических исследований, позволяющий ранжировать участки акватории и береговой зоны в зависимости от геотехнических свойств отложений; выявлять и картировать палеодолины, представляющие собой наиболее опасные зоны с точки зрения хозяйственной деятельности; картировать палеоландшафты различных этапов развития послеледниковых водоемов, и рассчитывать мощности голоценовых илов, относящихся к слабым грунтам, обладающих наибольшей ассимиляционной емкостью накопления поллютантов, и представляющих собой, таким образом, наибольшую с экологической точки зрения потенциальную опасность, как источники вторичного загрязнения при техногенном воздействии.

Глава 3. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ДНА И БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Пространственное геоэкологическое районирование дна восточной части Финского залива является приоритетной задачей настоящего исследования.

3.1. Существующие подходы к геоэкологическому районированию дна морских акваторий

Обзор истории развития подходов к геоэкологическому и эколого-геологическому картированию приводится В.А.Шахвердовым в работах, посвященных составлению карт экологогеологического блока Атласа геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря» [Атлас..., 2010; Шахвердов..., 2009; 2010].

«Под эколого-геологической (экологической) картой понимается картографическое отображение геологической среды и происходящих в ней процессов, оказывающих влияние на экосистемы и среду обитания человека» [Методические рекомендации..., 1994].

«Схема эколого-геологических условий является фактографической. На ней показываются реально существующие геологические природные и техногенные объекты и процессы, которые влияют (или при определенных условиях могут влиять) на экологическую обстановку территории» [Инструкция.., 1995].

«Геоэкологическое картографирование – это картографирование геологической среды как многокомпонентного объекта с быстроизменяющимися во времени и пространстве свойствами. Геоэкологическая карта отражает состояние геоэкологической среды определенной территории на конкретный отрезок времени» [Кочетков и др., 1998а].

«Под геоэкологическим картографированием понимается отображение на топографической основе экологического состояния геологической среды в естественных условиях и ее изменений, вызванных хозяйственной деятельностью. В определенных условиях возникает необходимость отображения на геоэкологических картах экологического состояния не только компонентов геологической среды, но и связанных с геологической средой компонентов других сред» [Кочетков и др., 19986].

«Эколого-геологические карты должны представлять собой графо-математическую модель эколого-геологической обстановки, дающую обобщенное изображение на топографической основе оценки состояния компонентов литосферы, отображающих ее экологическое состояние (функции). По сути, речь идет о графическом отображении системы «литосфера – биота – человек» с акцентом на свойства литосферы определяющие состояние биоты. Основным картируемым показателем является интегральная или покомпонентная оценка эколого-геологического состояния литосферы...» [Трофимов, Зилинг, 1998]. Автор обзора [Шахвердов, 2009; 2010] приходит к выводу, что под геоэкологическими и эколого-геологическими картами понимаются совершенно разные по своей сути документы, отличающиеся по целевому назначению, масштабу, набору показателей и признаков, полноте охвата картируемых компонентов геологической среды, и достоверности, и, соответственно, результирующие карты характеризуются широким разнообразием методических подходов, легенд и способов изображения картируемых показателей.

За прошедший с момента публикации Атласа период ситуация не изменилась. Как отмечает М.А. Холмянский [Холмянский и др., 2017], вследствие отсутствия унифицированных подходов к геоэкологическому картированию дна морских акваторий, большинство специалистов, работающих в данной сфере, применяют авторские подходы.

В рамках создания Госгеолкарты (ГК) масштабов 1:1000000 и 1:200000 составляются схемы эколого-геологической опасности (масштаб схем 1:2500000 и 1:500000 соответственно), отображающие экспертную оценку экологической обстановки на картируемой площади в зависимости от эндо- и экзодинамических процессов, возможности катастроф, степени геохимического и радиоактивного загрязнения и техногенного воздействия на геологическую среду. Задачей схемы является выделение площадей наибольшего эколого-геологического риска для жизни и хозяйственной деятельности человека. Эколого-геологическая обстановка оценивается по пяти градациям – от благоприятной до катастрофической [Методическое..., 2017]. Указанные подходы применимы, очевидно, преимущественно к суше, поэтому авторы эколого-геологических схем различных листов ГК используют для картирования не одинаковые критерии. В качестве примера можно привести соответствующие схемы, составленные для листов R1-2 (Чукотское море) [Бондаренко и др., 2014], где основой картирования является оценка загрязнения поверхностных вод, донных отложений, бентосных сообществ, а также радиоактивной обстановки, и для листа R-41 (Карское море), где карта построена на основе ландшафтного районирования, выполненного в свою очередь, с использованием геоморфологической и литологической карт и карты четвертичных отложений. Информации о загрязнении донных отложений и распределении бентосной фауны приводится в объяснительной записке [Шишкин и др., 2012].

3.2. Разработка критериев геоэкологического районирования дна и береговой зоны восточной части Финского залива

По результатам проведенного анализа, за основу применяемой в настоящей работе геоэкологической оценки и районирования акватории восточной части Финского залива приняты категории сложности инженерно-геологических условий на шельфе из СП 11-114-2004, с модификациями, обусловленными геоэкологическими и физико-географическими особенностями исследуемого бассейна. В соответствие геоэкологическим условиям поставлена потенциальная геоэкологическая опасность.

Актуальность предложенного подхода с точки зрения геоэкологии связана с принципиальной важной ролью абиотических факторов в структуре донных (бентосных) ландшафтов, а также описанными в главе 1 особенностями техногенного воздействия на дно и береговые зоны восточной части Финского залива.

В ходе реализованного в 2012-2014 гг. при участии автора диссертационной работы проекта TOPCONS, направленного на трансграничное картирование подводных ландшафтов восточной части Финского залива, был выполнен анализ значимости абиотических факторов для развития бентоса. С помощью программ статистической обработки BEST и LINKTREE был произведен анализ гидрологических и геолого-геоморфологических параметров и базы данных о распределении бентосной фауны в различных масштабах (от 1:500 000 [Kaskela et al., 2017] до 1:10000 [Орлова и др., 2014; Orlova et al., 2019]). Анализ позволил выявить значимые корреляционные связи между видовым составом и биомассой бентоса и рядом гидрологических и геолого-геоморфологических факторов. Было установлено, что наиболее значимыми абиотическими факторами, формирующими подводные ландшафты Финского залива в масштабе 1:500000 являются 1) мутность, 2) придонная соленость, 3) расположение изучаемого участка в открытой части залива либо в волновой тени островов, а также 4) гетерогенность донного субстрата (коэффициент изменений рельефа и поверхностного осадочного покрова на единицу площади) и 5) наличие/отсутствие кислорода на границе дно-вода. При аналогичном анализе, выполненном для детальных полигонов исследования (масштаб 1:10000), когда фактор солености перестает играть роль (являясь в пределах полигона постоянным), значимыми становится рельеф дна и гранулометрический состав донных отложений.

Исключительное разнообразие и интенсивность хозяйственной деятельности диктуют необходимость внедрения системы Морского пространственного планирования (МПП) [Лаппо, Миленина, 2014] в основе которого должно лежать геоэкологическое районирование, что позволит еще на этапе принятия решений о реализации проектов выбирать оптимальные как с экономической, так и с экологической точек зрения варианты их реализации. Следует отметить, что ряд видов хозяйственной деятельности (прежде всего, дноуглубление, дреджинг, подводные свалки

грунта и др. виды воздействия на дно, приводящие к резкому повышению мутности воды), исходя как из упомянутых выше результатов исследований [Kaskela et al., 2017], так и по данным натурных наблюдений [Экосистема..., 2008; Сухачева, Орлова, 2014; Сухачева, 2014] оказывают максимальное негативное воздействие на бентосные сообщества, вызывая деградацию подводных ландшафтов.

Для создания интегральной схемы районирования были использованы следующие критерии, отражающие основные элементы геологической среды береговой зоны и дна акватории: геоморфологические условия, геологическое строение и тектоника, экзогенные геологические процессы, экологическое состояние, газонасыщенность грунтов, техногенное воздействие. По критериям аналогичным существующим [СП 11-114-2004, Методика «Критерии оценки., 1992] было предложено ранжирование оценки опасности (благоприятности) экологического состояния геологической среды: относительно удовлетворительные, напряженные и критические (табл. 3.1). Таблица 3.1.

Критерий состояния	относительно удовлетворительное	напряженное	критическое
Геоморфологические условия	Равнинные участки дна, рельеф нерасчлененный	Наклонные участки дна с плавным изменением глубинных отметок, рельеф слаборасчлененный	Участки дна с резкими изменениями глубинных отметок (гряды, банки и т.д.), поверхность сильно расчленена
Геологическое строение и тектоника	Выходы на поверхность (или близко к ней) морен, мощность послеледниковых отложений меньше 10 метров, отложения современных илов отсутствуют	Мощность послеледниковых отложений больше 10 метров, отложения современных илов отсутствуют	Мощность послеледниковых отложений больше 10 метров, разрез завершается слоем современных илов мощностью более 0,5 м; зона разрывных нарушений; зона развития погребенных врезов
Экзогенные геологические процессы	Экзогенные геологические процессы проявлены слабо; вне зоны волнового поля, скорости придонных течений недостаточны для размыва поверхностных отложений	Экзогенные геологические процессы имеют ограниченное развитие; слабое воздействие на дно волнения и течений	Активные экзогенные геологические процессы (гравитационные процессы и т.д.); интенсивное воздействие на дно волнения и течений
Экологическая обстановка	Алевропелитовые илы как депонирующая среда поллютантов отсутствуют	Алевропелитовые илы незагрязненные	Алевропелитовые илы, загрязненные
Газонасыщенность грунтов	Газонасыщенные илы отсутствуют	Отдельные локальные поля газонасыщенных илов	Зоны сплошных газонасыщенных илов
Техногенное воздействие	Практически отсутствует	Незначительное техногенное воздействие	Значительное техногенное воздействие антропогенных изменений дна акватории

Критерии оценки экологического состояния геологической среды

Геоморфологические условия. Для оценки геоморфологических условий восточной части Финского залива приято решение учитывать в первую очередь не количество геоморфологических форм на единицу площади, а наличие уклонов в рельефе морского дна, то есть его вертикальную расчлененность. Первым шагом стало создание актуальной цифровой модели рельефа дна (ЦМРД) с использованием всех имеющихся источников данных (оцифровка батиметрических карт масштабов 1:200000-1:50000, геофизических профилей и эхолотирования, выполненных в ходе работ ВСЕГЕИ 1984-2018 гг.) (рис. 3.1).



Рисунок 3.1. ЦМРД восточной части Финского залива.

Геоморфологическая схема построена по данным геопространственного анализа цифровой модели рельефа дна акватории. С использованием инструмента ГИС вычисления углов склона были составлена схема относительных углов наклона поверхности дна, а применение инструмента VRM группы ВТМ позволило рассчитать относительную вертикальную расчлененность рельефа (рис. 3.2).

Для ранжирования по геоморфологическому критерию была проведена интеграция геопространственных данных о морфологии дна. С применением инструмента ГИС «Алгебра карт» были объединены данные об углах наклонов и о расчлененность рельефа. Выделены следующие слабонаклонное, классы: 1) дно относительно ровное, сформированное подводными субгоризонтальными аккумулятивными равнинами или террасами; 2) дно с выдержанным уклоном, представляющее собой поверхность морского дна на переходе от берега к седиментационным бассейнам или между террасами разных уровней; 3) расчлененное дно, как правило образованное моренными грядами и локальными банками, резко выступающими над окружающей поверхностью дна.



Рисунок 3.2. Схемы направленности уклонов поверхности (А), батиметрический индекс позиции (Б), углов склона (В) и относительных углов наклона поверхности дна.

Геологическое строение и тектоника. В СП 11-114-2004 предлагается производить оценку геологических условий по расчлененности (наличию определенного числа геологических слоев) в первых тридцати метрах геологического разреза. В геологические критерии вошли данные об особенностях приповерхностного геологического строения, определяющего условия освоения геологической среды, основанные на интерпретации материалов сейсмоакустического профилирования, данные о наличии погребенных долин и данные о положении разрывных нарушений.

Для построения интегральной схемы геологических условий была выполнена интерпретация сейсмоакустических данных в контексте поставленной задачи. На архивных и вновь полученных записях высокочастотного профилографа в ходе обработки и интерпретации акустических временных разрезов выделено 3 основных акустических комплекса (АК) и ряд аномальных объектов естественного происхождения. Описанные ниже интерпретационные признаки были сформулированы автором в ходе анализа значительного объема акустических разрезов [Буданов и др., 2019].

В основании информативной части разреза фиксируется поверхность акустического фундамента, характеризующаяся высокой интенсивностью отраженного сигнала (рис. 3.3). Ниже этой поверхности происходит полное затухание сейсмического сигнала. По данным интерпретации сейсмических записей и результатам опробования донных отложений на подавляющей части акватории акустический фундамент (AK1) представлен валунными суглинками - ледниковыми отложениями (моренами). В редких случаях акустическим фундаментом служат коренные дочетвертичные породы или песчаные отложения водно-ледникового генезиса. Поверхность морены и дочетвертичных образований, как правило, характеризуется сложно-расчлененным грядовым рельефом. Поверхность кровли песчаных водно-ледниковых отложений обычно выровнена [Буданов и др., 2019].

Морена и дочетвертичные породы пригодны для возведения инженерных сооружений. Дочетвертичные породы в северной части залива в пределах Балтийского кристаллического щита представлены гранитами, гранито-гнейсами и кристаллическими сланцами архей-протерозойского возраста (AR-PR). Их выходы на поверхность дна были зафиксированы на акустических записях в районе Выборгского залива. Данные породы характеризуются высокой прочностью и устойчивостью. На юге изучаемой площади коренные породы представлены полускальными терригенными сцементированными плотными и мало деформируемыми породами венда [Дашко, 2011]. К достаточно плотным и прочным грунтам относятся и четвертичные отложения, слагающие акустический фундамент: песчаные отложения Балтийского ледникового озера (lgIIIbl) и приледниковых озер (lgIIIos), флювиогляциальные отложения осташковского горизонта (fIIIos), а также валунные песчано-глинистые отложения, в составе которых преобладают супеси валунные, иногда переслаивающиеся с суглинками - ледникового отложения осташковской горизонта (gIIIos) [Ломтадзе, 1984].

По данным ГСШ-200 [Федоров и др., 1995ф], эти отложения имеют следующие физикомеханические свойства: Wect - 25-51%, плотность часто около 2 г/см³, удельный вес от 2,72-2,75 г/см³, сцепление превышает 5 кПа.

Как правило, над АК1 выделается толща, для которой характерно наличие серии протяженных отражающих горизонтов, маркирующих границы внутренних слоев, которые в значительной мере повторяют геометрию подстилающей границы (облекающая форма залегания). Интенсивность отражений изменяется по разрезу, не постоянно расстояние между слоями, что может свидетельствовать о незначительных изменениях по латерали условий осадконакопления. Кровля отложений комплекса выделяется по протяженной отражающей границе, интенсивность которой не постоянна. Как правило, эта граница идет параллельно с внутренними слоями, но на некоторых участках пересекает их, что свидетельствует о размыве горизонта. Это подтверждается и фактическими геологическими данными. По данным геологического опробования комплекс

представлен существенно глинистыми ледниково-озерными отложениями позднего неоплейстоцена, от слоистых «ленточных глин» в основании разреза АК2 до тонкополосчатых и почти монотонных в верхней части разреза (рис.3.4) [Буданов и др., 2019].



Рисунок 3.3. Пример интерпретации акустического разреза с изображением AK1. Фрагменты оцифрованных с бумажных носителей архивных акустических разрезов ВСЕГЕИ с выделенным AK1 A) запись 1991 года, комплекс представлен ледниковыми отложениями и/или дочетвертичными породами Б) запись 1987 года, комплекс представлен песчаными отложениями

Иногда в пределах АК2 наблюдаются акустически прозрачные участки, нивелирующие (заполняющие) неровности нижележащего рельефа. Мощность комплекса выдержана и составляет в среднем 10 м. С инженерно-геологической точки зрения для отложений комплекса характерны следующие особенности: 1) специфические условия залегания (облекающие); 2) слоистость, часто тонкая у глинистых разностей, обусловливающая анизотропию свойств; 3) неоднородное в разрезе физическое состояние по плотности, пористости, влажности и консистенции. В связи с четко выраженной слоистой текстурой отложений, отмечается анизотропность их инженерных свойств. Для отложений АК2 характерна сравнительно высокая влажность, пористость и пониженная плотность. Консистенция их неустойчивая, скрыто-мягкопластичная или даже скрытотекучая. Они сильно и неоднородно сжимаемы, имеют малое сопротивление сдвигу. При уплотнении обнаруживают значительные остаточные деформации. При промерзании сильно пучатся. Отложения комплекса относятся к инженерно-геологическому типу грунтов, не пригодному для возведения инженерных сооружений, со строительной точки зрения они являются слабыми породами [Ломтадзе, 1984].



Рисунок 3.4. Пример интерпретации акустического разреза с изображением АК1. Фрагменты архивных (2000 год) акустических разрезов ВСЕГЕИ с выделенными АК А) АК2 представлен только слоистой глинистой толщей Б) АК2 представлен комбинацией слоистой и гомогенной толщ.

Верхняя граница АК2 четко фиксируется на акустических разрезах по несогласному залеганию, прослежена также на значительной площади дна залива. Высокая интенсивность границы обусловлена эрозионным горизонтом, сформированным в результате резкого падения уровня Балтийского ледникового озера после его прорыва в океан и длительного регрессивного периода существования водоема.

Согласно результатам инженерно-геологических исследований, выполняемых в рамках мониторинга геологической среды прибрежно-шельфовой зоны, глины АК2 имеют текучую консистенцию (IL от 2,28 до 3,80). Влажность некоторых образцов незначительно превышает 100%, но в целом колеблется в интервале 60-100%. Сопротивление вращательному срезу у

рассматриваемых глин достигает значений в 5,9 кПа, что не является высоким показателем, однако ощутимо выше, чем сопротивление срезу у илов вышележащего АКЗ. Плотность достигает 1,6 г/см³.

Несмотря на то, что глины этой толщи выглядят по своим показателям прочнее, чем очень слабые и текучие илы, рассматривать их как надежные грунты при строительстве нельзя. Выше по разрезу выделяется третий комплекс отложений (АКЗ). Для него характерно наличие серии субгоризонтальных отражающих горизонтов различной интенсивности (рис. 3.5). По данным геологического опробования комплекс представлен алевропелитовыми илами голоценового возраста. Наличие серии границ в пределах комплекса (до 5) связано с изменениями условий седиментации, а самые интенсивные отражающие горизонты маркируют значительные изменения уровня моря в голоцене. Отложения комплекса завершают геологический разрез и, заполняя относительные понижения в рельефе кровли нижележащих комплексов, формируют современные седиментационные бассейны.



Рисунок 3.5. Пример интерпретации акустического разреза с изображением AK1. Фрагменты акустических разрезов, полученных в совместном (ВСЕГЕИ, ИА РАН) рейсе НИС «Академик Николай Страхов » в 2017 году с выделенными AK A) с изображением двух локальных седиментационных бассейнов Б) с изображением газонасыщенных осадков, покмарком и линейной ложбиной.

Свободная вода в составе илов преобладает над водой связанной, а концентрация минеральных частиц в единице объема осадка мала. По литературным данным, влажность илов обычно достигает 70-80% и более, коэффициент пористости измеряется единицами, а плотность скелета нередко равна 0,8-0,9 г/см³, показатель относительной влажности измеряется обычно

единицами. Минеральные частицы, как и осадок в целом, сильно гидратированы. Взаимодействия между минеральными частицами, возникающие при коагуляции (структурные связи), весьма ослаблены (тысячные доли, мегапаскалей, редко 0,01 МПа) и обусловливают их скрытотекучее состояние [Ломтадзе, 1984; Воронкевич, 2011].

По результатам инженерно-геологических испытаний илов восточной части Финского залива, влажность поверхностного слоя этих отложений колеблется в пределах от 120 до 670%, коэффициент водонасыщенности составляет 0.95-1.00, плотность 1.10-1.30 г/см³, коэффициент пористости варьирует от 3 до 16, сопротивление срезу от 0.1 до 0.8, показатель консистенции I_L составляет от 2.3 до 14.6. Сопротивление вращательному срезу 4-3.6 кПа. По результатам исследований можно заключить, что прочность илов предельно мала, угол естественного откоса стремится к нулю. При приложении к илам даже малых усилий они быстро переходят в текучее состояние. Под действием вертикальных нагрузок деформации илов характеризуются свободным уплотнением, сопровождающимся выжиманием свободной воды, а при сравнительно быстром приложении таких нагрузок гидродинамическое давление, создающееся в них, вызывает их выпор изпод нагрузки. По литературным данным, коэффициент сжимаемости илов аналогичного состава измеряется 0,2-0,3 МПа, а модуль общей деформации глинистых разностей равен 0,1-0,5 Мпа (в суглинистых и супесчаных изменяется от 1,0 до 2,0-2,5 Мпа) [Ломтадзе, 1984; Воронкевич, 2011].

Илы, как правило, являются отложениями недоуплотненными и чувствительными к изменениям естественного сложения, после механического нарушения которого они способны восстанавливать свое состояние и прочность структурных связей, т. е. обладают способностью к тиксотропным превращениям. Этому способствуют возникновение и развитие явлений синерезиса (сближение частиц под влиянием поверхностных сил с частичным вытеснением воды) [Воронкевич, 2011].

Приведенная характеристика илов указывает на то, что они действительно слабые образования, обладающие характерными, резко выраженными специфическими свойствами - относятся к инженерно-геологическому типу грунтов, не пригодных для возведения инженерных сооружений.

На локальных участках исследуемой акватории в АКЗ по характерным особенностям акустической записи выделяются поля газонасыщенных осадков и покмарки, которые будут рассмотрены ниже, при обсуждении критерия «газонасыщенность осадков».

Акустические границы между комплексами характеризуются резкими несогласиями, обусловленными историей геологического развития региона в позднем неоплейстоцене-голоцене (в частности, граница верхненеоплейстоценовых и голоценовых отложений четко фиксируется сейсмограммами по несогласному залеганию, а также - на значительной площади дна залива - по наличию эрозионного песчаного горизонта, сформировавшегося в результате резкого падения уровня Балтийского ледникового озера после его прорыва в океан 11.7-11.5 тыс.л.н. и длительного регрессивного периода существования водоема), позволили выделить и оцифровать поверхности ледниковых и поздненеоплейстоценовых отложений, и рассчитать мощность голоценовых алевропелитовых илов и построить соответствующие модели палеоландшафтов восточной части Финского залива для различных временных срезов. (рис. 3.5, 3.6).



Рисунок 3.5. Схема частично погребенного неоплейстоценового ледникового рельефа, построенного по данным интерпретации НСП.

Анализ построенных моделей позволил выявить затопленные формы палеорельефа. По результатам анализа моделей палеоповерхностей были определены участки выполнения детальных исследований, на которых по данным полевых работ с применением многолучевого эхолота и сейсмоакустического профилирования по сети сближенных профилей удалось впервые выделить сформировавшиеся при дегляциации региона затопленные краевые образования стадии Паливере (около 12.7 тыс.кал.л.н. [Kalm et al. 2011]), а также комплексы ледниковых форм (друмлиноподобные гряды, озы, морены Де Геера), отличающиеся контрастным рельефом и значительными углами склонов (рис. 3.7), что существенно восполняет недостаток региональных данных, отмечаемый исследователями [Hughes et al. 2016].



Рисунок 3.6. Схема частично погребенного неоплейстоценового озерно-ледникового рельефа, построенного по данным интерпретации НСП.

Анализ сейсмоакустических данных показал, что в геологическом строении верхней части разреза восточной части Финского залива практически повсеместно (за исключением локальных выходов на поверхность дочетвертичных отложений) выделяется более трех структурновещественных комплекса (CBK), включающих дочетвертичные породы, ледниковые отложения и до пяти комплексов послеледниковых отложений. По такому числу слоев геологической среды практически всю площадь акватории Финского залива следовало бы отнести к 3-й наивысшей категории сложности согласно СП 11-114-2004. Однако, учитывая инженерно-геологические свойства ледниковых отложений [Дашко и др. 2011; Ломтадзе, 1984], позволяющие считать их устойчивым основанием, целесообразно оценивать мощность и дифференцированность послеледниковых отложений, при этом особое внимание следует уделять наличию илов в геологическом разрезе, представляющих собой слабые грунты.

Изменчивость физических свойств СВК по латерали, учитываемая при присвоении категории сложности инженерных условий в СП 11-114-2004, наиболее характерна для ледниковых отложений, но эти изменения существенно не влияют на их устойчивость к внешним воздействиям и в предлагаемой классификации не учитываются.



Рисунок 3.7. Результаты детальных исследовани Трехмерные модели палеоповерхностей и современного рельефа ключевых участков А - «о-в Мощный», Б - «Выборгский залив»; Карты подводных ландшафтов ключевых участков и результаты анализа билогических станций [Orlova M.,

Куаbchuk D. et al., 2019] В,Д - «о-в Мощный» (условные обозначения: 1 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенные, смешенные осадки с ЖМК, 2 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенная, осадки - алевропелиты, расположенные на размытых глинах с ЖМК, 3 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенная, осадки - алевропелиты с ЖМК, 4 - зона низкого волнового воздействия, кислородонасыщенная, осадки - алевропелиты, расположенные на размытых глинах с ЖМК, 3 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенная, осадки - алевропелиты с ЖМК, 4 - зона низкого волнового воздействия, кислородонасыщенная, осадки-илы, 5 - зона низкого волнового воздействия, бескислородная среда, осадки - илы, 6 - станции геологического опробывания, 7 - станции биологического опробывания), Г,Е - «Выборгский залив» (условные обозначения: 1 - участи высокого уровня волнового воздействия (жёсткое дно с валунами), 2 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенные на размытых глинах с ЖМК, 3 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенные на размытых глинах с ЖМК, 3 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенные на размытых глинах с ЖМК, 3 - участки среднего волнового воздействия, кислородонасыщенные, осадки (алевропелиты) с ЖМК, 4 - зона низкого волнового воздействия, бескислороднасыщенная, осадки - илы, 5 - зона низкого волнового воздействия, бескислороднасыщенная, осадки - илы, 5 - зона низкого волнового воздействия, бескислороднасыщенная, осадки - илы, 6 - станции геологического опробывания, 7 - станции биологического опробывания).

Опасные эндогенные геологические процессы, связанные с глубинными преобразованиями горных пород и структурными изменениями различного происхождения, в условиях Финского залива и его береговых зон, в целом находятся на низком уровне. Тем не менее, в пределах дна залива выделены разрывные нарушения [Атлас.., 2010], положение которых учитывалось при составлении схемы.

Экзогенные геологические процессы

Под экзогенными геологическими процессами подразумеваются широко развитые в регионе оползание склонов, ледовая абразия, заносимость. Также сюда отнесены особенности придонной литодинамики, провоцирующие донный размыв, обусловленный в береговой зоне гидродинамическим воздействием штормовых волн на дно, а в глубоководных частях акватории – особенностями придонных течений, выраженных в наличии областей бассейновой седиментации и областей «транзита» или «не накопления» современных донных осадков. Для создания карты интенсивности волнового воздействия на дно акватории были использованы результаты математического моделирования [Wijkmark et al., 2013; Леонтьев, 2008].

При построении карты-схемы в региональном масштабе, очевидно, что интенсивность экзогенных геологических процессов в подводной части береговой зоны, проявленных в виде абразионно-аккумулятивной деятельности, в целом достаточно низкая. Значительные штормовые события, оказавшие большое негативное влияние на состояние берега, выраженное в размыве

береговых уступов, в принципе, не отражаются на подводном склоне, что видно из анализа эхолотных профилей. Максимальные скорости размыва подводного берегового склона в зоне наибольшей абразии (Курортный район Санкт-Петербурга) по данным сравнительного анализа навигационных карт и эхолотных промеров составляют 2-3 см/год (локально до 5 см/год).

Для районирования дна залива в соответствии с экзогенным геологическим критериям были использованы следующие данные. По результатам моделирования [Wijkmark et al., 2013] подверженности дна и берегов Российской части Финского залива волновому воздействия в зависимости от морфологии рельефа дна, геометрии островов и береговой линии и экспозиции различных участков по отношению к преобладающему волнению акватория восточной части Финского залива разделена на три класса: 1) открытая; 2) умеренно открытая; 3) защищенная. К «открытой» волнению акватории отнесена область на самом западе российского сектора Финского залива в глубоководном районе; «умеренно открытой» волнению является практически вся изучаемая часть акватории; к «защищенной» от волнения отнесены шхеры на западе Выборского залива, пролив Бьеркезунд (волновая тень за архипелагом Березовых островов), кутовые части Копорской и Лужской губ, а также вся акватория Невской Губы.

Математическое моделирование, выполненное для восточной части Финского залива И.О. Леонтьевым [Леонтьев, 2008] показало, что глубина менее 3.5 м является существенной для переработки дна волновым воздействием. В условиях широкого развития подводных террас, моренных возвышенностей и мелководности Невской Губы довольно обширные районы донного рельефа попадают в зону опасного воздействия. Глубины менее 3.5 м широкой полосой окаймляют берег Невской Губы, о. Котлин, о. Сескар, о. Мощный, развиты у пос. Большая Ижора, в Копорском заливе, Выборгском заливе, на подводном продолжении Кургальского п-ова и в Лужском заливе.

Особенностью восточной части Финского залива является наличие значительного количества локальных седиментационных бассейнов, в которых происходит устойчивая аккумуляция алевропелитовых илистых осадков. Современные седиментационные бассейны восточной части Финского залива располагаются в относительных понижениях рельефа на глубинах от 4-5 м в Невской губе до 60-70 м в районе острова Гогланд и разделены относительно более поднятыми участками дна, на которых преобладают процессы размыва, транзита или нулевой седиментации и формируются, соответственно грубообломочные, песчаные отложения и миктиты. В контексте анализа современных экзогенных процессов эти области рассматриваются как области устойчивой седиментации.

Экологический критерий

Помимо наиболее слабых инженерно-геологических показателей в разрезе донных отложений илы также являются критической зоной в морской среде с экологической точки зрения.

Загрязнение донных отложений особенно прогрессирует в последние 30-40 лет и наиболее характерно для внутренних морей. Современная промышленность производит 70 000 видов синтетических материалов из них 1500 веществ обладают токсическим, мутагенными и канцерогенными свойствами [Акимов и др., 1992]. Пограничная зона вода-донные отложения – конечное звено превращений и захоронения многих химических соединений, распространенных в биосфере. Эта зона является областью как накопления, так и активной трансформации химических веществ, в том числе загрязняющих, которые циркулируют в водной толще, поступают в море с суши или атмосферы и достигают дна со взвешенным веществом или нисходящими токами воды [Иванов и др., 2006]. Поверхность раздела вода-дно и прежде всего сами донные осадки представляют собой постоянно действующий источник вторичного загрязнения морской воды, которое происходит при взмучивании иловых отложений вследствие гидрологических явлений либо деятельности донных животных (биологическое взмучивание) [Иванов и др., 2006; Израэль, 2009].

Основным критерием оценки экологического состояния геологической среды в данной работе является рассчитанная по геофизическим данным площадь поверхности и мощность (объем) алевропелитовых илов седиментационных бассейнов, являющиеся депонирующей средой для токсичных микроэлементов. Отложения, накопленные в них, при изменении физико-химических условий в водоеме могут стать источником их вторичного поступления сначала в поровые воды, а затем и в поверхностные [Липатникова и др., 2014]. Тяжелые металлы, поступающие в водную среду, вовлекаются в цепь разнообразных превращений и миграционных процессов под влиянием многочисленных факторов. Общая площадь распространения алевропелитовых илов на акватории восточной части Финского залива составляет 4.3 тыс. км², объем оценивается в 62 км³ (рис. 3.7).

Как показало сравнение полученных данных с результатами геохимических и геоэкологических исследований и мониторинга, выполнявшихся «Севморгео» [Информационный..., 2007; 2009; 2012; 2013; 2014], на всех станциях мониторинга, расположенных в пределах выделенных седиментационных бассейнов, не менее, чем за пятилетний период фиксировались превышения ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) как минимум по пяти загрязняющим компонентам (Cd, As, Pb. Zn, Cu, Ni, Cr, Cs-137, нефтепродукты) (рис. 3.8).

На содержание и миграционные процессы тяжелых металлов в природных водах оказывают влияние такие факторы, как сезонность, минерализация воды, температурный режим, содержание растворенного кислорода, кислотно-основные условия (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и ионное состояние металла [Давыдова и др., 2016]. Для оценки этих процессов большое значение имеет изучение распределения химических веществ в разнотипных осадках и определение миграционноспособных форм нахождения элементов [Липатникова и др., 2014]. Для восточной части Финского залива изучение загрязнения донных отложений в основном

ограничивалось изучением валовых концентраций тяжелых металлов в донных осадках. Изучение распределения в осадках форм нахождения элементов, от чего собственно и зависит их способность к аккумуляции и миграции, изучены недостаточно.



Рисунок 3.7. Схема мощности голоценовых отложений, построенная по данным интерпретации высокочастотного НСП.



Рисунок 3.8. Схема оценка уровня загрязненности алевропелитовых илов восточной части Финского залива. Условные обозначения: 1 – зоны подводного размыва/ненакопления; 2 – зоны развития алевропелитовых илов седиментационных бассейнов; станции мониторинга «Севморгео» 2005-2015 гг.: 3 – станции мониторинга, на которых превышение ОДК по комплексу загрязняющих компонентов отмечалось эпизодически; 4 - 4 – станции мониторинга, на которых превышение ОДК по комплексу загрязняющих компонентов отмечалось постоянно [Информационный..., 2007; 2009; 2012; 2013; 2014].

При этом можно отметить, что в последние десятилетия эвтрофикация вод Финского залива возрастает. За счет дефицита кислорода (как следствие затоков морских более соленых вод, а также активных биохимических процессов в летне-осеннее время) восстановительные условия в придонных слоях воды и поверхностных осадках возникают довольно регулярно (рис. 3.9), причем зачастую они наблюдаются не только в относительно глубоководных районах залива, но и в мелководных условиях [Kotilainen et al., 2007; Максимов, 2006; Vallius et al., 2011].

Среди макрокомпонентов наиболее чувствительны к развитию восстановительных условий в осадках Fe и Mn, а также ряд ассоциированных с ними микроэлементов (например, V и As). К показательным процессам перехода соединений металлов в мобильные формы в условиях дефицита кислорода является растворение железо-марганцевых конкреций, наиболее богатые поля которых располагаются по периферии локальных бассейнов седиментации алеропелитовых илов.



Рисунок 3.9. Распределение зон постоянно и периодически наблюдаемых бескислородных условий в придонных условиях восточной части Финского залива по данным пробоотбора. Условные обозначения: 1 – зоны постоянного присутствия кислорода на границе дно-вода; 2 – устойчиво бескислородные зоны на границе дно-вода; 3 – зоны периодической гипоксии на границе дно-вода.

Другой возможной причиной вторичного загрязнения водной толщи и экосистемы, связанной с илами седиментационных процессов является воздействие описанных в главе 1 техногенных процессов [Сухачева, 2014].

Газонасыщенность отложений

Этот критерий предлагается применять для оценки геоэкологического восточной части Финского залива, так как в описываемой акватории газонасыщенные осадки имеют достаточно широкое распространение. Оценка участков дна по этому критерию осуществляется по площади распространения такого типа осадков.

На локальных участках исследуемой акватории поля газонасыщенных осадков и покмарки выделяются в толще морских литориновых илов (АКЗ) по характерным особенностям акустической записи. Первые идентифицируются по интенсивным горизонтальным локальным отражающим горизонтам, ниже которых располагаются зоны потери корреляции и существенное затухание зондирующего сигнала (существенное понижение интенсивности отраженного сигнала или его отсутствие ниже по разрезу). Вторые представляют собой формы микрорельефа (результат выхода газофлюидов из геологической среды в водную толщу) и на акустических разрезах выделяются по характерной V-образной форме границы поверхности дна и потере корреляции отражений ниже нее. Как правило, покмарки встречаются на участках с газонасыщенными осадками. Наличие газов (в основном - метана) в толще илов еще больше разуплотняет донные отложения, нарушает их внутреннюю структуру, что негативно сказывается на прочностных свойствах. При техногенном воздействии на газонасыщенные осадки возможен переход газов в водную толщу.

Техногенное воздействие

Акватория восточной части Финского залива имеет высокую степень антропогенной нагрузки, проявленную в самых разнообразных формах, подробно описанных в главе 1.

3.3. Построение схемы геоэкологического районирования дна и береговой зон восточной части Финского залива

Результатом геоинформационной обработки данных о геологических, геоморфологических, литодинамических, экологических и др. условиях акватории восточной части Финского залива являлись матрицы данных по каждому из критериев. В зависимости от количества и содержания входящих данных влияющих на геоэкологические условия матрицы имели разную тематическую нагрузку [Буданов и др., в печати].

Для **геоморфологического критерия** были выбраны данные об относительных углах склонов и данные о вертикальной расчлененности рельефа.

Полученные матрицы представлены в Таблице 3.2. Необходимо отметить, что данные об углах уклона дна имеют ориентировочный вид, поскольку информация об их содержании снималась с навигационной карты, на которой углы уклона дна сильно снивелированы из-за дискретности входящих данных.

Таблица 3.2

Шифр легенды	Углы наклонов склона	Индекс вертикальной расчлененн	ости
		рельефа	
	Первая цифра в шифре	Вторая цифра в шифре	
1	Уклон дна менее 0.6°	Менее 0,000017	
2	Уклон дна более 0.6°	Более 0,000017	

Матрица данных геоморфологических критериев

Рабочая интегральная геоморфологическая схема построена на основе матрицы данных и геоинформационного анализа ЦМР дна восточной части Финского залива показана на рис. 3.10.

Результатом экспертной оценки опасности (не благоприятности) геоморфологических условий является Интегральная схема, показанная на рис.3.11. Геоморфологические классы разделены на три категории: «относительно удовлетворительные», «напряженные» и «критические».

Районирование, проведенное по геоморфологическому критерию, показывает, что наибольшей расчлененностью рельефа дна характеризуется северо-западная часть российского сектора Финского залива. В первую очередь, это объясняется геологическим строением дочетвертичного субстрата, близостью кристаллического фундамента к современной поверхности и меньшей по сравнению с другими районами мощностью четвертичных отложений. Рельеф дна юго-восточной части акватории более спокойный, осложнен вытянутыми в юго-восточном направлении линейными возвышенностями (грядами), идущими от островов в центральной части

залива к его юго-восточным берегам, что обусловлено более интенсивными процессами ледниковой экзарации дочетвертичной поверхности, сложенной породами осадочного чехла.



Рисунок 3.10. Рабочая интегральная геоморфологическая схема: шифр легенды см. в матрице данных геоморфологических критериев.



Рисунок 3.11. Интегральная схема геоэкологической обстановки восточной части Финского залива, основанная на оценке геоморфологических условий дна исследуемой акватории: 1 - относительно удовлетворительная (равнинные участки дна, рельеф нерасчлененный); 2 - напряженная (наклонные участки дна с плавным изменением глубинных отметок, рельеф слаборасчлененный); 3 - критическая (участки дна с резкими изменениями глубинных отметок (гряды, банки и т.д.), поверхность сильно расчленена).

Склоны гряд образуют протяженные поверхности. На глубинах дна менее 10 м, склоны приобретают довольно крутые уклоны, что вызвано формированием здесь подводных аккумулятивных террас, также окаймляющих прибрежное мелководье в восточной части залива.

По площадной оценке к неблагоприятным (критическим) условиям отнесены 11% поверхности морского дна, напряженным – 32%, к относительно удовлетворительным – 57%. Геоморфологический критерий является наиболее значимым с точки зрения прокладки подводных коммуникаций, трубопроводов, кабелей и т.д. Согласно составленной схеме наиболее неблагоприятными условиями характеризуется северо-западная часть исследуемой площади, подводная периферия островов и Лужский залив. Напротив, та же зона является наиболее важной с точки зрения развития современных подводных ландшафтов и защиты биоразнообразия вследствие максимальной гетерогенности субстрата.

В критерий оценки геологических условий вошли данные о наличии погребенных долин и данные о положении разрывных нарушений. Данные матрицы представлены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3

Шифр	Геологическое строение	Наличие разрывных	Наличие
легенды		нарушений	погребенных долин
	Первая цифра в шифре	Вторая цифра в	Третья цифра в
		шифре	шифре
1	Выходы на поверхность (или	Отсутствуют	Отсутствуют
	близко к ней) морены		
2	Мощность послеледниковых	Присутствуют	Присутствуют
	отложений больше 10 метров		
3	Мощность послеледниковых		
	отложений больше 10 метров		
4	Нет данных по		
	сейсмоакустике		

Матрица данных геологических критериев

Рабочая интегральная схема проявления геологических условий построена на основе матрицы данных и геоинформационного анализа для восточной части Финского залива показана на рис. 3.12, интегральная схема на рис. 3.13.

Геологический критерий является наиболее значимым с точки зрения строительства (в том числе, формирование намывных и насыпных территорий с последующей застройкой, строительство ветропарков с подводным основанием, крупных гидротехнических сооружений, строительство высотных зданий в береговой зоне, примыкающей в палеодолинам и др.).



Рисунок 3.12. Рабочая интегральная схема геологических условий: шифр легенды см. в матрице данных геологических критериев.



Рисунок 3.13. Интегральная схема геоэкологической обстановки восточной части Финского залива, основанная на результатах оценки строения геологической среды исследуемой акватории: 1 - Выходы на поверхность (или близко к ней) морен, мощность послеледниковых отложений меньше 10 метров, отложения современных илов отсутствуют, 2 - Мощность послеледниковых отложений больше 10 метров, отложения современных илов отсутствуют, 3 - Мощность послеледниковых отложений отложений больше 10 метров, разрез завершается слоем современных илов мощностью более 0,5 м; зона разрывных нарушений; зона развития погребенных врезов; 4 – данные отсутствуют.

В схему экзогенных геологических процессов были включены следующие параметры: области устойчивой седиментации; глубина акватории; открытость акватории волнам, определяющая активный слой дна подверженный волновой переработки (Табл. 3.4)

Рабочая интегральная схема проявления экзогенных геологических процессов построена на основе матрицы данных и геоинформационного анализа для восточной части Финского залива показана на рис. 3.14.

Таблица 3.4

Шифр	Области устойчивой	Глубина моря	Открытость акватории волнам
легенды	седиментации		
	Первая цифра в	Вторая цифра в	Третья цифра в шифре
	шифре	шифре	
1	Отсутствуют	Более 3.5 м	Защищенная
2	Присутствуют	Менее 3.5 м	Открытая

Матрица данных экзогенных геологических процессов



Рисунок 3.14. Рабочая интегральная схема проявления экзогенных геологических процессов: шифр легенды см. в матрице данных экзогенных геологических процессов.

Результатом экспертной оценки опасности (не благоприятности) проявления экзогенных геологических процессов является Интегральная схема, показанная на рис. 3.15. Классы проявления экзогенных геологических процессов разделены на три категории: «относительно удовлетворительные», «енапряженные» и «критические».

Таким образом, наибольшей интенсивностью опасных ЭГП характеризуются зоны прибрежных мелководий восточных береговых зон крупных заливов южного берега (Нарвский, Лужский, Копорский), западных оконечностей островов (малый Тютерс, Мощный, Малый, Сескар, Котлин), а также участки северного (в пределах Курортного района) и южного (от м. Серая Лошадь до пос. Большая Ижора) берегов залива. Полученные результаты подтверждаются данными мониторинга ЭГП [Информационный..., 2011; 2012; 2013; Рябчук и др., 2012; Ryabchuk et al., 2016 и др.].

Полученная схема имеет наибольшее значение с точки зрения планирования и реализации берегозащитных мероприятий.



Рисунок 3.15. Интегральная схема геоэкологической обстановки восточной части Финского залива, основанная на результатах оценки развития опасных геологических процессов и явлений: 1 - относительно удовлетворительная (экзогенные геологические процессы проявлены слабо вне зоны волнового поля, скорости придонных течений недостаточны для размыва поверхностных отложений); 2 - напряженная (экзогенные геологические процессы имеют ограниченное развитие, слабое воздействие на дно волнения и течений); 3 - критическая (активные экзогенные геологические процессы, интенсивное воздействие на дно волнения и течений).

Схема экологической обстановки составлена на основании генерализации литологической карты дна акватории (рис. 3.16).

В контексте хозяйственной деятельности экологический критерий является наиболее значимым с точки зрения любых видов техногенеза, связанных с механическим воздействием на дно (дноуглубление, свалки грунта, добыча полезных ископаемых и др.). В данном случае возникает опасность для экосистемы, обусловленная, с одной стороны, потенциальной угрозой деградации подводных ландшафтов в связи с повышением мутности водной толщи, и, с другой стороны, со вторичным загрязнением опасными веществами, захороненными в бассейнах седиментации, воды и биоты в акватории, а также пляжей в береговой зоне.



Рисунок 3.16. Интегральная схема экологической обстановки восточной части Финского залива. Условные обозначения: 1 – зоны подводного размыва/ненакопления; 2 – зоны развития алевропелитовых илов седиментационных бассейнов.

Для геоэкологической оценки газонасыщенности была построена схема плотности распределения локальных депрессий в газонасыщенных грунтах. Для снятых с сейсмоакустических профилей точечных данных о положении локальных депрессий (покмарков и промоин) в зонах развития газонасыщенных илов средствами ГИС была построена схема плотности их распределения (рис. 3.17). Для градации данных были выделены три класса: газонасыщенные илы отсутствуют; средней плотности (менее 1 на квадратный километр) скопления депрессий в газонасыщенных илах и высокой плотности скопления депрессий в газонасыщенных илах (более 1 на квадратный километр).

Наличие локальных депрессий в газонасыщенных илах является фактором, осложняющим любые виды хозяйственной деятельности в акватории.

Генерализованная схема техногенногенной нагрузки, использованная для построения карты, выглядит как показано на картосхеме ниже (рис. 3.18).

В процессе создания Интегральной геоэкологической схемы акватории и береговой зоны восточной части Финского залива с применением ГИС-технологий было установлено, что рассмотрение критерия «Техногенная нагрузка» по методике, аналогичной анализу природных
факторов, является методически не корректным. Это обусловлено тем, что зоны хозяйственной деятельности значительно различаются как по характеру (фарватеры на глубинах менее 15 м, где постоянно ведется дноуглубление и судовые ходы на остальной акватории, и воздействие на дно практически не оказывается), так по периоду (кратковременное или долговременное) и периодичности (постоянные или временные) воздействий, которые могут привести к негативному влиянию на окружающую среду.



Рисунок 3.17. Схема плотности распределения локальных депрессий в газонасыщенных грунтах восточной части Финского залива: 1 - газонасыщенные илы отсутствуют, 2 -средней плотности (менее 1 на квадратный километр) скопления депрессий в газонасыщенных илах, 3 - высокой плотности скопления депрессий в газонасыщенных илах (более 1 на квадратный километр).



Рисунок 3.18. Схема плотности распределения техногенного воздействия на дно в восточной части Финского залива: 1 – низкий уровень техногенной нагрузки; 2 – высокий уровень техногенной нагрузки; 3 - районы административных ограничений на осуществление хозяйственной деятельности.

Интегральная **схема геоэкологического районирования** на совокупности критериев, отражающих геоэкологические условия и степень опасности освоения акватории восточной части Финского залива (рис. 3.19). Выделенные ранее критерии были внесены в сводную матрицу, представленную в табл. 3.5.

Анализ полученной схемы показывает, что геоэкологические условия наибольшей площади дна (57 %) изучаемой акватории могут быть классифицированы как «относительно удовлетворительные». Эти зоны наиболее благоприятны для наибольшего числа видов хозяйственной деятельности. 32% площади дна относится к категории «напряженных». Сюда относятся, прежде всего, бассейны седиментации, в которых происходит накопление алевропелитовых илов, являющихся средой накопления загрязнения. Также к зонам с напряженной геоэкологической обстановкой относятся области интенсивного волнового размыва дна в пределах прибрежных мелководий и подводных поднятий.

Таблица 3.5

	относительно		
критерий состояния	удовлетворительное	напряженное	критическое
Экологический	1	3	3
Экзогенные геологические процессы	1	2	3
Газонасыщенность грунтов	1	2	3
Геоморфологические условия	1	2	3
Геологическое строение	1	2	3
Техногенное воздействие	1	2	3

Матрица интегральной оценки геоэкологического состояния в баллах

Зоны, имеющие критическое геоэкологическое состояние и опасные для хозяйственной деятельности, занимают 11% площади акватории и пространственно приурочены к зонам развития газонасыщенных осадков и крутым склонам подводных поднятий.

Следует отметить, что при планировании различных видов хозяйственной деятельности наряду с Интегральной схемой целесообразно использовать специализированные схемы, составленные для отдельных критериев. Так например, при строительстве гидротехнических сооружений, ветропарков, платформ и т.д. наиболее значимыми критериями оценки как безопасности и эффективности проекта, так и воздействия на окружающую среду, являются геологический и геоморфологический. При планировании деятельности, связанной с дноуглублением на первый план выходит экологический критерий.



Рисунок 3.19. Интегральная схема геоэкологического районирования акватории восточной части Финского залива: 1 - площади техногенного воздействия на дно, интегральная оценка геоэкологического состояния в баллах: 2 - 6-8, 3 - 8-9; 4 - 9-13 [Буданов и др., в печати]

Глава 4. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПАЛЕОДОЛИН АКВАТОРИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Рельеф дна Финского залива в значительной степени предопределен рельефом дочетвертичных образований, представленных раннепротерозойскими метаморфическими и интрузивными комплексами, образующими нижний структурный этаж, и породами вендскофанерозойского плитного чехла, относящимися к верхнему этажу. Породы кристаллического фундамента обнажаются на дочетвертичной поверхности преимущественно на северо-западе российской части Финского залива, а в южной части он перекрыт породами верхнего этажа и образует фундамент Русской плиты. Пенепленизированная кровля нижнего структурного этажа полого погружается в юго-юго-восточном направлении, за счет чего мощность плитного чехла в этом направлении постепенно возрастает. В северном направлении, в связи с денудационным срезанием верхней части, чехол выклинивается, что привело к сложной конфигурации границы между Балтийским щитом и Русской плитой. По периферии площади распространения чехла в зонах повышения рельефа поверхности фундамента имеют место группы маломощных останцов венда [Амантов, 2010].

Современный рельеф дочетвертичной поверхности Финского залива сформировался в ходе кайнозойской денудации, в которой весьма существенную роль играла ледниковая. Наибольшей эрозии подверглись осадочные терригенные и карбонатные породы чехла. По результатам оцифровки данных НСП 1987-2000 гг. составлена схема рельефа дочетвертичной поверхности (рис.4.1).



Рисунок 4.1. Схема дочетвертичного рельефа восточной части Финского залива (составлена с использованием данных А.В.Амантова).

Характерной особенностью района являются многочисленные глубокие (до абсолютных отметок -100 - -150 м) эрозионные врезы и ложбины, выработанные преимущественно в терригенных и карботатных породах осадочного чехла [Амантов, 2010], что четко прослеживается на составленной схеме. Специфика крайней восточной части Финского залива заключается в выраженности близширотного (110°) простирания в разнопорядковых формах современного и коренного рельефа. Напротив, в юго-восточной части Финского залива палеодолины приобретают СЗ-ЮВ (Копорский и Нарвский заливы) и субмеридиональное (Лужский залив) простирание.

4.1. Отечественный и зарубежный опыт исследований палеодолин и их роль в решении градостроительных задач, водоснабжении и экологической безопасности

4.1.1. Современные представления о системе погребенных долин на севере Европы

Наличие сложной системы погребенных плиоцен-плейстоценовых долин является характерной чертой геологического строения северной Европы [Малаховский, 1984]. На сегодняшний день накоплен значительный объем данных, полученных как на суше, так и на акваториях морей. Корреляция между которыми все еще очень неоднозначна из-за недостатка данных в транзитной зоне [Huuse et al., 2000]. Прослеживание палеодолин с помощью традиционных для мелководья геофизических методов сталкивается с наибольшими методическими сложностями.

Авторы работ [2006; Rumpel H.-M. et al, 2006; Jørgensen F., Sandersen B.E., 2008, Huuse et al., 2000], ориентированных на изучение палеодолин, отмечают положительный эффект от комплексирования нескольких методов (геофизических и геологических данных, разнометодных геофизических данных или внутриметодное комплексирование) для повышения информативности исследований.

Современные представления о рельефе дочетвертичных пород на суше базируются главным образом на данных бурения. В районах с большим количеством буровых скважин были выявлены узкие линейно вытянутые депрессии в породах, подстилающих четвертичный покров. Е.В. Рухина еще в 1946 г. писала о существовании в Прибалтике и Ленинградской области «системы древних долин, базис эрозии которых располагается значительно ниже современного (по-видимому, не менее чем на 120 м)» [Рухина, 1946].

О сохранности реликтовых речных долин на морском дне в начале прошлого столетия высказывался Φ . Нансен, который построил карту древней гидросети для шельфа Баренцева моря по небольшому объему промерных работ. Главные направления в рисовке гидросети на этой карте сохранились и на последующих картах, построенных в результате обобщения большого объема современных гидрографических данных и материалов морских геолого-геофизических исследований [Ласточкин, 1978]. В начале второй половины прошлого века существование сети погребенных врезов по линиям понижений в рельефе дна было подтверждено сейсмоакустическими методами геофизики, которые благодаря возможности ведения непрерывной съемки зачастую детальнее, чем бурение, позволяют изучать форму врезов (однако не всегда на полную глубину) и условия залегания рыхлых отложений, выполняющих врез, но несут лишь качественную информацию о составе и косвенные сведения о возрасте пород, слагающих исследуемый разрез [Φ едоров, 1977]. Не исключена также возможность занижения значений глубин палеоврезов на участках ледниковой аккумуляции, поскольку скопления валунного материала

зондирующий сигнал и представляют собой экран для распространения упругих волн, а при большой мощности их волновая картина неотличима на сейсмограмме от поверхности кристаллических пород. К настоящему времени методами сейсмоакустики довольно детально изучены акватории Западной и Центральной Балтики с ее заливами [Свиридов и др., 1976].

Происхождение погребенных долин в подвергавшихся оледенению низинных районах северо-запада Европы было предметом интенсивных дискуссий за последнее столетие. На сегодня существуют следующие основные гипотезы о происхождении долин, обзор которых приведен в статье Mads Huuse [Huuse et al., 2000]: (1) стационарный субледниковый дренаж, обусловленный гидростатическими градиентами давления, (2) катастрофический выброс талой воды, (3) ледниковая эрозия, (4) эрозия рек в период гляциоэвстатической низменности, (5) агградация дельтовых каналов, (6) приливный размыв.

Большинство исследователей предпочитают полигенетическое происхождение, включающее два или более механизмов, но предлагаемые гипотезы охватывают все гипотезы (16). Происхождение долин все еще остается предметом спора, поскольку большинство исследователей предлагают полигенетический подход к образованию данных форм рельефа, включающий в себя комбинацию нескольких механизмов. Основная часть противоречий, по- видимому, исходит из поиска единственного механизма образования для всех врезов. Несмотря на разногласия в отношении происхождения, существует общее мнение о том, что подавляющее большинство погребенных долин в Северной Европе было окончательно сформировано в течение последних трех основных оледенений.

Последние 30 лет большинство исследователей сходятся на том, что механизм формирования долин включал субледниковые эрозионные процессы (то есть теории 1-3), причем талая вода считалась наиболее важным эрозионным агентом [Ehlers, 1984; Ehlers and Linke, 1989, Piotrowski, 1994, 1997; Niewiarowski, 1995; Praeg, 1996; Smed, 1998]; также не менее активно продолжают развиваться гипотезы, связанные с изменением базиса эрозии [Salomon sen, 1993, 1995; Schwab and Ludwig, 1996; Japsen, 1998, Дашко и др., 2011].

4.1.2. Геологическое строение погребенных долин Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Первые схемы строения поверхности дочетвертичных отложений, на которых показаны палеодолины, составлены В.Г. Ауслендером [Ауслендер, 2002] на основе анализа опорных геологических скважин, пробуренных на территории города (рис.4.2).



Рисунок 4.2. Схема морфологии поверхности дочетвертичных пород [Ауслендер, 2002].

1 - ордовикское плато; 2 — ордовикский глинт, выраженный в виде уступа (а) и склона (6); 3 — уступы (а) и склоны (б), выработанные в кембрийских отложениях; 4 — кембрийская предглинтовая низина; 5 — вендская низина; 6 — вендская возвышенная равнина; 7 — локальные останцевые повышения; 8 — древние погребенные долины; 9 — уклоны равнинных поверхностей.

Для акватории Финского залива на основе интерпретации данных НСП и геологического пробоотбора, собранных в рамках ГСШ-200, а также более поздних работ ВСЕГЕИ А.В. Амантовым построена карта рельефа поверхности дочетвертичных образований, на которой выделяется положение и глубина палеодолин (рис.4.3).

Следует отметить, что на всех схемах, отражающих морфологию дочетвертичного рельефа и включающих акваторию, долины прослеживаются в акватории Невской Губы вдоль ее северного берега, однако никаких данных о положении врезов и составе отложений, заполняющих погребенные долины, не приводится.

В целом, по данным разных авторов [Ауслендер, 2002; Амантов, 2002; Геологический..., 2009], особенности строения системы палеодолин на акватории Невской губы – их количество, расположение, конфигурация и геометрия тальвегов врезов, значительно отличаются.



Рисунок 4.3. Карта рельефа поверхности дочетвертичного рельефа [Амантов, 2002; Амантов и др., 2012].

1, 2 – прослеженные и предполагаемые эрозионные врезы с преобладающими глубинами рельефа кровли дочетвертичных образований глубже –80 м (абс.) (1), –50...–80 м (2); 3–5 – слаборасчлененная пологонаклонная либо волнистая равнина на вендских или кембрийских (в южной береговой зоне) глинах и алевролитах с доминирующими отметками –25...–50 м (3), 0...–25 м (4), выше 0 м (5,6).

На территории Санкт-Петербурга и в акватории Невской губы погребенные долины являются врезами в вендских (в центральной и северной части рассматриваемого района) или кембрийских (на юге) образованиях, которые выполнены и перекрыты четвертичными отложениями. В строении врезов выделяют тальвег – самая глубокая (осевая) часть вреза, склоновые участки и террасы. Врезы имеют U-образную форму, как правило, они ассиметричны, т.е. борта имеют различную крутизну, на пологом склоне возможно террасирование и высота бортов (от тальвега до террас) может отличаться. Палеодолины характеризуются значительной глубиной вреза в дочетвертичных породах до 100 м при ширине до 1-2 км, крутизна склонов относительно невелика и изменяется обычно в пределах 12-15°, реже 18°, в верхней части – менее 10° [Дашко,

2011]. Тальвеги самых глубоких долин находятся на абсолютных отметках до -110 м. На акватории и в береговой зоне Невской губы на дочетвертичную поверхность выходят отложения Котлинской свиты Вендской системы. В этих породах выработаны исследуемые палеодолины (рис. 4.4). Погребенные долины Приневской низменности и Невской губы, в современной литературе [Ауслендер, 2002] называют магистральными, т.е. крупными реками, в которые остальные впадали (рис.4.5)



Рисунок 4.4. Геологическая карта дочетвертичных образований [Геологический атлас Санкт-Петербурга, 2009].

Нижняя подсвита Котлинского горизонта (V_2kt_1) представлена переслаиванием мелкозернистых песчаников с алевролитами и глинами. В нижней части толщи преобладают песчаники, встречаются разнозернистые до крупнозернистых и гравелистых, тогда как в верхней части глинистые тонко-ритмичнослоистые отложения [Николаева, 2012]. Мощности прослоев пород достигают 50 см. Мощность подсвиты возрастает с запада- северо - запада на восток и юго - восток от 20-23 м до 30-38 м. Отложения этой подсвиты почти на всей исследуемой территории перекрыты верхней посвитой Котлинского горизонта (V_2kt_2) и вскрыты только самыми глубокими палеодолинами на северо-западе Санкт-Петербурга.

Для верхней подсвиты также характерно изменение от переслаивающихся тонкослоистых глин и алевролитов, мощность прослойков колеблется от 30 до 300 см, с линзовидными прослойками сидерита (2-3 см) до плотных тонко-ритмичнослоистых глин с маломощными (5-10 см) прослойками алевролитов. Мощность подсвиты достигает 150 м вне палеодолин.

В то время как природа возникновения углублений в дочетвертичных породах и по сей день остается дискуссионной, нет сомнений, что современная их морфология полигенетична, а положение сети приурочено к тектонически ослабленным участкам земной коры. Деятельность ледников переуглубила, расширила и полностью заполнила врезы четвертичными отложениями.

В Приневской низине, на площади Санкт-Петербурга и на дне Финского залива (вне древних долин) обычная мощность четвертичной толщи варьирует от 20 до 45 м. Значительные мощности до 80-150 м приурочены к палеодолинам. В четвертичной толще, в пределах долин, выделяют следующие комплексы: до трех ледниковых (нижний - днепровский (gII_{dn}), средний - московский (gII_{ms}) и верхний – осташковский (gII_{os})), до двух межледниковых, позднеледниковые и послеледниковые, встречающиеся на территории города [Ауслендер, 2002]. Как правило, рельеф дочетвертичной поверхности наследуется более молодыми отложениями, выполаживаясь вверх по разрезу [Буданов и др., 2017].

Мореные толщи формировались во время оледенений и на исследуемой территории имеют преимущественно покровный характер. Они представлены суглинками с гравием, галькой и валунами, которые за счет высокого содержания глинистой составляющей могут выступать в качестве водоупоров.

Свойства и состав межморенных, поздне- и послеледниковых образований зависят от условий осадконакопления, которые обусловлены морфологией поверхности коренных пород. Ледник последней стадии валдайского оледенения, отступая (в северо-западном направлении), формировал приледниковое озеро, которое затапливало котловину, в настоящее время совпадающая с Приневской низиной, Невской губой и Финским заливом. Материал, поступавший в него с отступающего ледника, осаждался в спокойных условиях – откладывались преимущественно глинистые осадки (глины, суглинки ледниково-озерного генезиса).

Отступая дальше, ледник продолжал поставлять осадочный материал в сформированный водоем, потоки стекали по склону и имевшимся углублениям в южном направлении и откладывали на своем пути наиболее крупный обломочный материал, формируя супесчаные и песчаные отложения с гравием и галькой (флювиогляциальные отложения), заполняющие долины северной части города (рис.4.6).



Рисунок 4.5. Геологический разрез палеодолины в районе реки Смоленка [по Ауслендер, 2001]. Условные обозначения: 1 - насыпной грунт, 2 - глины, 3 - суглинки и глины, 4 - супеси, 5 - пески, пески с гравием и галькой, 6 - супеси валунные (морена), 7 - суглинки валунные (морена); V_{kt} котлинская свита венда; четвертичные отложения: вологодский горизонт gII_{v1} - ледниковые отложения, fII_{v1} - флювиогляциальные отложения, $lgII_{v1}$ - ледниково-озерные, московский горизонт, gII_{ms} - ледниковые отложения, $lgIl_{ms}$ - ледниково-озерные, осташковский горизонт, gII_{os} ледниковые отложения, $lgIl_{os}$ - ледниково-озерные, $lgIl_{b1}$ - отложения Балтийского ледникового озера, голоцен: ml IV - озерные и морские отложения; tIV - техногенные отложения.

На абсолютных отметках около -80 м установлена морена самого древнего для рассматриваемой территории днепровского оледенения мощностью 5-9 м. Морена представлена плотными тугопластичными суглинками с гравием, галькой и валунами кристаллических пород до 10%. Выше залегают озерные, озерно-ледниковые и флювиогляциальные отложения днепровско-московского горизонта (l,lg,fIldn-ms), представленные разнозернистыми песками, содержащими гравий, гальку и мелкие валуны (мощностью от 1 м до 10 м) и суглинками, реже супесями и песками (мощность от 1 до 15 м) [Ауслендер, 2001ф].

Следующий гляциоседиментационный цикл представлен московской мореной (суглинки, реже супеси с включениями гравия, гальки и валунов кристаллических и осадочных пород; мощность варьирует от 1 до 27 м) и московско-осташковским нерасчлененным горизонтом

120

(l,lg,fIII_{ms-os}) (мелко- и крупнозернистыми полевошпатово-кварцевые пески с гравийно-галечным материалом) и озерно-ледниковыми отложениями (тонкодисперсные глины; мощность 2-13 м).



Рисунок 4.6. Древняя долина р. Невы в районе Адмиралтейства [по Ауслендер, 2001ф]. Условные обозначения как на рисунке 4.3.

Наиболее широко распространены, залегающие выше, ледниковые отложения осташковского горизонта (gIII_{os}). Они перекрыты водными осташковскими образованиями и более молодыми отложениями. Морена залегает в основном на водных осадках московско-осташковского горизонта, реже на московских ледниковых образованиях. Мощность ее изменяется от 2 до 24 м. По составу морена неоднородна, представлена преимущественно суглинками тугопластичными, реже мягкопластичными, супесями с включением гравия, гальки, валунов кристаллических пород. В толще моренных суглинков иногда встречаются линзы песков и супесей незначительной мощности и протяженности. Ледниковые отложения подвергались значительному перемыву водами озерноледникового бассейна и более поздними водами морских бассейнов, в результате этого приповерхностная часть морены имеет более песчанистый состав. Иногда на поверхности морены

залегают маломощные прослои озерно-ледниковых отложений Балтийского ледникового озера (lgIIIbl): пески, супеси и суглинки.

Голоценовые отложения в пределах изученной территории представлены чередованием морских и континентальных образований, в основном связанных с историей развития Балтики в голоцене. К ним отнесен комплекс нерасчлененных голоценовых отложений Литоринового моря и Анцилового озера (m,lH). Литологически они представлены преимущественно мелко- и тонкозернистыми песками, супесями и суглинками. Наиболее выдержанными являются супесчаные слои. Все разновидности, как правило, содержат неравномерно распределенные примеси органических веществ различной степени разложения. Часто встречаются гнезда, линзы или отдельные прослои торфа (plH) мощностью от 0.5 м до 2.0 м и заторфованных грунтов, образование которых соответствовало периоду регрессии моря и заболачивания местности. Комплекс озерноморских отложений залегает, в основном, с поверхности и образует морскую террасу вдоль побережья Финского залива. Они залегают на озерно-ледниковых образованиях Балтийского ледникового озера, иногда на осташковской морене. Мощность колеблется от 0.5 до 15.0 м. Осадки комплекса представлены песками, супесями и суглинками [Ауслендер, 2001ф; Николаева, 2012].

Кроме того, на рассматриваемой территории развиты биогенные и техногенные образования. Биогенные представлены торфом хорошо- и средне-разложившимся мощностью до 1.0 м. Техногенные образования (tH) развиты в новых районах застройки, представлены отходами промышленного и строительного производства, бытовыми отходами (свалки), намывными грунтами, мощность их от 1.0 м до 3.0 м [Ауслендер, 2001ф; Николаева, 2012]. 4.2. Особенности инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических условий погребенных долин Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Строение погребенных долин учитывается при проектировании строительных объектов, прокладке подземных коммуникаций и решении гидрогеологических задач. На исследуемой территории долины вскрывают отложения верхнего отдела венда, поверхность которого вне долин полого погружается к юго-востоку. Как правило, палеодолины выполнены четвертичными, наиболее слабыми отложениями в разрезе осадочного чехла. Песчано-глинистый разрез в пределах этих структур обладает способностью к развитию пластических деформаций, что способствует оплыванию грунтов в подземные выработки при нарушении технологии ведения горных работ или неправильном ее выборе [Дашко, 2011].

Дочетвертичные отложения имеют практическое значение при строительном освоении территории, т.к. они могут служить непосредственным естественным основанием для различных зданий и сооружений или входить в состав пород зоны влияния при небольшой мощности перекрывающих отложений, а также средой, вмещающей различные подземные сооружения.

На территории Санкт-Петербурга глины Котлинского горизонта являются вмещающей средой для подземных коммуникаций и изучены достаточно хорошо. По минеральному составу они относятся к гидрослюдистым или каолинитово-гидрослюдистым глинам. По гранулометрическому составу глины относятся типично к алевритовым разностям и по ГОСТ 25100-95 классифицируются как пылеватые, а по числу пластичности как глины и суглинки тяжелые.

Физическое состояние глин зависит от глубины залегания. С увеличением глубины плотность закономерно повышается, а пористость уменьшается. Глины, выходящие на современную поверхность, часто выветрелые и дислоцированные. Глины обладают высоким сопротивлением сжатию и разрыву, медленно размокают в воде [Ауслендер, 2001ф].

Более подходящим основанием под сооружения могут служить породы кристаллического фундамента. По данным геолого-разведочных работ, геофизических и геохимических исследований установлено, что кристаллический фундамент в пределах города и прилегающих районов разбит системой региональных тектонических разломов северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания, а также сетью более мелких разрывных нарушений на отдельные блоки, которые образуют в плане структуру типа «битой тарелки» (рис. 4.7). Активная разломная тектоника фундамента определяется его расположением в зоне сочленения двух крупных тектонических структур – Балтийского щита и северо-западной части Русской плиты. В пределах этой зоны зафиксировано движение блоков фундамента относительно друг друга с разной скоростью и интенсивностью в различные периоды геологического времени, в том числе и в современное (четвертичное) время [Дашко, 2011].



Рисунок 4.7. Схема новейшей тектоники района Санкт-Петербурга [Ядута, 2006]. Области с разной интенсивностью и направленностью движений: 1 — умеренных поднятий, амплитуда 50-120 м; 2 относительно стабильные с тенденцией к ассиметричному поднятию, амплитуда 0-20 м; 3 дифференцированных движений, амплитуда 0–100 м (а — интенсивных, б — умеренных, в — слабых); 4 — Дизъюнктивные опусканий. амплитуда 0-50 м; 5 границы областей. структуры: 6 — зоны разломов, обновленные и (или) заложенные на неотектоническом этапе; 7 — сдвиги; 8 преимущественно унаследованные современные блокформирующие разломы. Индикаторы наиболее активных участков новейших дизъюнктивных структур: 9 — зоны повышенной активности и нестабильности движений, установленные по ландшафтным признакам МАКС; 10-13 — участки разломов и зон разломов (10 — выраженные в рельефе и морфографии гидросети, 11 — с высокими градиентами и локальными максимумами в поле плотности гидросети, 12 — интенсивных знакопеременных вертикальных движений, 13 — эпицентры землетрясений по историческим данным с магнитудой от 2.5 до 2.99 (а) и от 4.0 до 4.99 (б)).

Гидрогеологические условия

В четвертичных отложениях города прослеживается до трех водоносных горизонтов: нижний межморенный, верхний межморенный, а также горизонт грунтовых вод поздне- и послеледниковых отложений. В коренных породах выделяют вендский комплекс, ломоносовский, кембро-ордовикский и ордовикский горизонты, два последних получили распространение только на самом юге территории города вдали от Невской губы и в этой работе рассматриваться не будут [Дашко, 2011]. Водоносный горизонт грунтовых вод залегает первым от поверхности в песчаных (чаще тонко и мелкозернистых), супесчаных и торфяных отложениях, его мощность не превышает 3-5 метров. Он не имеет напора, глубина от поверхности до УГВ обычно не превышает 2-3 м. Водоносный горизонт загрязнен на территории города и имеет минерализацию обычно более 1 г/л. В качестве загрязнителей выступают хлориды, сульфаты, аммоний, органические компоненты, а также углекислота, содержание которых необходимо учитывать при оценке агрессивности грунтов по отношению к конструкционным материалам канализационных систем неглубокого заложения.

На севере и северо-востоке города между осташковской и московской моренами в озерноледниковых и флювиогляциальных песках (мелкозернистых, часто пылеватых) развит верхний межморенный водоносный горизонт. Мощность его изменяется от 0.3 до 33 м и достигает максимума на участках развития погребенных долин. Величина напора горизонта изменяется от 2 до 38 м, водообильность горизонта неравномерна, удельные дебеты скважин меняются от 0.1 до 4.5 л/с. Минерализация вод этого горизонта изменяется в пределах 0.1-0.6 г/л. Воды этого горизонта используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Нижний межморенный водоносный высоконапорный (20 – 70 м) горизонт развит на северной и юго-восточной частях территории города в толще между днепровскими и московскими моренными отложениями. Водовмещающими отложениями выступают разнозернистые пески мощностью от 1-2 до 30-70 м в погребенных долинах, глубина залегания комплекса изменяется от 40 до 80 м. Воды горизонта имеют минерализацию 0.1-0.7 г\л и характеризуются низкой степенью агрессивности по отношению к железобетонным обделкам коллекторных тоннелей. Но ввиду значительной мощности именно этот горизонт представляет наибольшую опасность с точки зрения риска возникновения аварийных ситуаций.

Сравнительно большая мощность и свойства отложений, выполняющих погребенные палеодолины, в которых сосредоточены значительные запасы высококачественных, со временем восполняющихся подземных вод, делает их перспективными источниками водоснабжения [Николаева, 2012].

Ниже в южной части города между нижнекембрийскими и верхнекотлинскими глинами расположен Ломоносовский водоносный горизонт. Его напор достигает 50-60 метров, а минерализация изменяется от 0.4 до 1.3 г/л в восточном и юго-восточном направлении. Для этих вод характерна гидрокарбонатная гидрокарбонатно-хлоридно натриевая минерализация, что повышает степень их агрессивности по отношению к металлическим конструкциям и железобетону обделок коллекторов.

Вендский водоносный комплекс представлен переслаиванием песчаников, алевролитов и глин суммарной мощностью 45-90 м, его кровля прослеживается на абсолютных отметках -100 - -

125м. Напор вод этого горизонта значительно варьировал во времени в зависимости от уровня потребления, так до начала активной эксплуатации (во второй половине XIX века) достигал максимума в 80-160 м, минимальный же напор был зафиксирован в 1977 году он составлял 30-50 м. В настоящее время пьезометрическая поверхность этого горизонта зафиксирована на глубине 15-20 м ниже уровня поверхности, что приводит к восходящему протеканию его вод через трещиноватые глины в четвертичную толщу и активному взаимодействию с блоками глинистых пород и конструкциями коллекторных тоннелей. Минерализация вендского водоносного комплекса изменяется от 3.5 до 5 г/л. Значительное содержание хлоридов (до 2.9 г/л) и ионов натрия и калия (до 1.7 г/л) делает воды горизонта агрессивными по отношению к конструкционным материалам. [Ауслендер, 2001ф]

Системы тектонических разломов трассируют положение ослабленной толщи коренных пород, в пределах которой в настоящее время фиксируются палеодолины. Для которых наблюдается перетекание минерализованных хлоридо-натриевых вод напорных водоносных горизонтов дочетвертичных комплексов через трещиноватые глины, что может приводить к разрушению конструкционных материалов [Дашко, 1998].

Геоэкологические условия

Инженерно-геоэкологические условия также осложняются биогенным загрязнением подземного пространства города, свидетельства о котором обнаруживаются на глубинах вплоть до 50-100 м в погребенных долинах. До освоения города порядка 75% площади города было заболочено. В разные этапы развития города болотные отложения (торф) при освоении территории частично или полностью снимались, засыпались или замывались. Из-за применения таких методов они оказались погребены под техногенными отложениями. Негативное влияние болот заключается в обогащении нижележащих рыхлых отложений микроорганизмами, которые продуцируют малорастворимые газы (метан, азот, сероводород и др.), переводящие песчано-глинистые грунты в неустойчивые состояния разуплотняя их, обычно прослеживается до глубины 30.0-50.0 м. [Дашко, 2011].

На протяжении всей истории развития города и в настоящее время канализационно-бытовые стоки являются постоянным источником загрязнения подземного пространства и городских водотоков. Длительность и непрерывность их воздействия, большие объемы сточных вод и их специфический состав способствуют глубокой трансформации химического состава подземных вод, а также состояния и свойств водовмещающих пород. Изменение окислительновосстановительной и микробиологической обстановки оказывает однонаправленное негативное воздействие на состояние и свойства пород переводя их в категорию более слабых деформируемых.

Микробиологическая пораженность пород отмечается вплоть до глубины 100 м (в пределах погребенных долин) [Дашко, 2008].

Таким образом, верхняя часть четвертичного разреза ввиду высокого уровня загрязнения обладает значительной биокорозионной способностью по отношению к бетонам и создает условия, приводящие к утончению металлических конструкций за счет восстановительных реакций, способствующих образованию легко растворимого двухвалентного железа.

Обоснование технологии ведения горных работ должно быть адекватно инженерногеоэкологическим условиям при обязательном учете наличия подземных вод, оценке их гидродинамического режима и уровня загрязнения. Яркими примерами геоэкологической опасности, которую представляют погребенные долины, являются случаи размыва тоннеля метрополитена на участке между станциями метро «Площадь мужества» и «Лесная». Затопления повторились дважды: в 1974 году при бурении в тоннеле, еще до открытия станции «Площадь Мужества», и в 1995 году, когда деформация стен тоннеля, где располагались перегонные пути, достигла критической величины. 4.3. Обобщенные физико-геологические модели палеодолин восточной части Финского залива и его береговой зоны

4.3.1. Обобщенные геологические разрезы палеодолин

Анализ большого количества геологических данных [Малаховский, 1984; Ауслендер, 2002; Николаева, 2012] показал, что на приморской территории исследуемого района палеодолины имеют различия преимущественно в наполнении врезов. Было составлено два базовых обобщенных геологических разреза погребенных долин.

Оба разреза (рис.4.8) представляют из себя пологие (с углами склона 12-16°) врезы в дочетвертичных отложениях Котлинского горизонта венда, заполненные песчано-глинистыми отложениями четвертичного возраста. Тальвеги врезов достигают абсолютных отметок -80 - -100 м, а склоны могут быть осложнены террасами. Дочетвертичный разрез представлен вендскими глинами, которые залегают на песчаниках также вендского возраста. Четвертичные толща представлена отложениями трех оледенений и соответствующими им межледниковыми и послеледниковыми отложениями. Соответствующие по возрасту ледниковые комплексы мало отличаются по составу и, как правило, представлены валунными суглинками.



Рисунок 4.8. Обобщенные геологические разрезы палеодолин.

характерен преимущественно супесчаный и песчаный состав.

4.3.2. Обобщенные геоэлектрические разрезы палеодолин

Сопротивления осадочных горных пород определяются тремя основными факторами – глинистость, пористость и минерализация грунтовых вод [Дортман, 1984]. Для исследуемой территории справочной информации об электрических свойствах отложений автору обнаружить не удалось. Для создания обобщенных геоэлектрических разрезов использовались данные о литологическом составе и минерализации вод, содержащихся в соответствующих отложениях, а также кривые зависимостей УЭС от минерализации подземных вод различных авторов [Зинченко, 2005; СП 11-105-97; Матвеев, 1985; Шевнин, 2006].

Палеодолины имеют песчано-глинистый разрез, его грунты имеют широкое разнообразие и представлены различными типами от глин до песков. Минерализация грунтовых вод в имеющихся водоносных горизонтах изменяется в пределах от 0.1 до 5 г/л [Дашко, 2011; Ауслендер, 2001]. Для определения модельных сопротивлений с корреляционных кривых (рис. 4.9) были сняты наибольшие и наименьшие значения УЭС для каждого типа грунтов при минерализации 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3.5 и 5 г/л.



Рисунок 4.9. Зависимость удельного электрического сопротивления водонасыщенных пород от минерализации а) по В.С. Зинченко б) по СП 11-105-97 в) по В.С. Матвееву г) по В.А. Шевнину

Данные были нанесены на графики в логарифмическом масштабе, на горизонтальной оси которых отложены значения минерализации грунтовых вод в г/л, а на вертикальной - значения УЭС



в Ом·м. Для максимальных и минимальных значений сопротивлений каждого типа грунта были построены линии тренда, описываемые степенной функцией (рис.4.10).

X - по В.А. Шевнину ◊ - по СП 11-105-97 ◊ - по В.С. Матвееву △ - по В.С. Зинченко

Рисунок 4.10. Зависимость удельного электрического сопротивления водонасыщенных пород от минерализации: а) для глин, б) для суглинков, в) для супесей, г) для песков.

Линии тренда ограничивают диапазон значений УЭС для определённой минерализации, образуя сегменты на графике. Все значения и сегменты были перенесены на единый график, площади, иллюстрирующие диапазон возможных значений УЭС, были выделены цветом в соответствии с типом осадков к которому они относятся, пересечений диапазонов не выявлено. (рис 4.11)

В соответствии с обобщенными геологическими моделями были составлены базовые геоэлектрические модели (рис 4.12). Разрез был разделен на семь физико-структурные комплексы (ФСК), обусловленные как сменой типа осадков, так и изменением минерализации грунтовых вод. Для обоих разрезов характерно увеличение значений УЭС в заполненном четвертичными отложениями врезе по сравнению с дочетвертичными отложениями, но контрастность выше в долинах второго типа ввиду более песчаного состава отложений и соответственно, большего УЭС.



X - по В.А. Шевнину ◊ - по СП 11-105-97 〇 - по В.С. Матвееву △ - по В.С. Зинченко

Рисунок 4.11. Сводная модель зависимости удельного электрического сопротивления водонасыщенных пород от минерализации. Условные обозначения: красный – песок, желтый – супесь; зеленый – суглинок; синий – глины.



Рис. 4.12. Обобщенные геоэлектрические модели палеодолин. (значения УЭС выделенных структурно-вещественных комплексов вынесены на рисунок в Ом·м)

На обобщенных геоэлектрических моделях погребенные долины представляют собой зоны повышенных значений УЭС по сравнению с вмещающими породами, сопротивление отложений,

133

выполняющих врезы долин первого типа, отличаются в разы, а второго – в десятки раз. Такой контраст в свойствах позволяет не только обнаружить погребенные долины, с использованием методов электроразведки, но и без привлечения дополнительных методов исследований произвести типизацию обнаруженного вреза.

4.3.3. Обобщенные акустические разрезы палеодолин

Акустические свойства горных пород (скорость распространения упругих волн и плотность) зависят от их минерального состава, структурно-текстурных особенностей, пористости, вида вещества, заполняющего поры и пустоты (газ, нефть, вода), а также от условий образования и залегания горных пород [Горная энциклопедия, 1991]. В условиях восточной части Финского залива определяющее значение для оценки таких свойств имеет литологический состав отложений, а минерализация практически не влияет на них.

По опубликованным данным [Ауслендер, 2001; Дашко, 2011; Алешин, 2010], для обобщенных геологических моделей были подобраны скорости распространения продольных и поперечных волн и плотности. В результате было выделено шесть ФСК с различными акустическими свойствами, составлены обобщенные акустические модели палеодолин (рис. 4.13).



Рисунок 4.13. Обобщенные акустические модели палеодолин.

На акустических моделях палеодолины представляют собой зоны пониженных плотностей (в среднем на 3-18%), скоростей распространения продольных волн (в среднем на 7-21%) и скоростей поперечных волн (3-17%) по сравнению с вмещающими породами. Такой контраст

свойств позволяет обнаружить и уточнить элементы строения погребённых врезов методами сейсморазведки и гравиразведки. Отсутствие существенных отличий в свойствах долин различного типа, обусловленное незначительным влиянием минерализации флюида на акустические свойства, делает невозможной их классификацию на основе этих методов без привлечения дополнительных исследований.

4.3.4. Физико-геологические модели палеодолин

Данные акустической, геоэлектрической и геологической модели были объединены в обобщенные физико-геологические модели паледолин (рис.4.14). В результате было выделено девять структурно-вещественных комплекса (СВК), обладающих уникальным набором физических и литологических свойств. Основные отличия моделей первого и второго типов связаны с СВК4, СВК5 и СВК7, соответствующие отложением межледниковых (Вологодско-Московского и Московско-Осташковского горизонтов) и послеледниковых комплексов.



Рисунок 4.14. Обобщенные модели палеодолин Санкт-Петербурга и акватории Восточной части Финского залива.

Для палеодолин региона характерны следующие геоэкологические особенности. Оба типа врезов представляют собой осложняющий фактор для строительства (высотного и подземного) изза увеличенной мощности ослабленных отложений. При этом долины второго типа также опасны из-за вероятности наличия плывунов в их разрезе и высокого уровня загрязнения подземных вод верхних водоносных горизонтов (способствующих ускорению коррозионных процессов железобетонных конструкций). В долинах второго типа возможно наличие водоносных горизонтов с большими запасами, со временем восполняющихся высококачественных вод.

На основе представленной типизации погребенных долин на полевых геофизических материалах (рис 4.15), полученных в ходе написания работы, были выделены палеодолины обоих типов.

На акватории Невской губы выделено и прослежено два вреза, невыраженных в современном рельефе (подтверждается данными акустических методов). Один врез расположен в центральной части водоема. Его ширина выдержана и составляет около 1.3 км, а длина его осевой линии, от северной оконечности о. Котлин до Василеостровского района Санкт-Петербурга – 27 км. По проявлению облика этой долины на геоэлектрических разрезах она была отнесена к долинам I типа. Геологические данные о строении продолжения этой долины на территории города также свидетельствуют о преимущественно глинистом составе отложений, выполняющих врез [Ауслендер, 2001ф]. Врез, прослеженный вдоль северного берега, имеет ширину 450-600 м, и протяженность осевой линии от створа КЗС до Приморского района Санкт-Петербурга около 8 км. По проявлению на геоэлектрических разрезах долина отнесена ко II типу, продолжение долины, прослеженное на суше, имеет по данным бурения преимущественно песчаное наполнение [Николаева и др., 2012].

Долины второго типа также обнаружены в акватории Сестрорецкого разлива и в береговой зоне (на пляже и прибрежной акватории) Курортного района Санкт-Петербурга (рис. 4.16), их ширина достигает 3.2 км в месте соединения двух врезов.

Фактическое положение зафиксированных врезов существенно отличается от предполагаемого (по опубликованным схемам), смещение тальвега достигает 400 м на суше и до нескольких километров на акватории, при этом геометрия врезов в Невской губе получила существенное уточнение во многом благодаря предложенной выше типизации (ранее считалось, что долина в центральной части протягивается от створа КЗС до Василеостровского района, а не от о. Котлин). Такие расхождения, в первую очередь, связаны с отсутствием фактических материалов в зоне пляжей и на малоглубинных акваториях.



Рисунок 4.15. Карта фактического материала, черными линиями показаны профили проведения комплексных геофизических исследований.



Рисунок 4.16. Схема пространственного распределения погребенных долин на малоглубинных акваториях Санкт-Петербурга

Выводы

1. Особенности геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга и погребенных долин в частности (низкая контрастность физических свойств отложений разреза, высокая дифференциация четвертичных отложений как по латерали, так и на глубину и так далее) представляет дополнительные важные аспекты, которые необходимо учитывать, как при обосновании методики исследований, так и при разработке подходов комплексной интерпретации данных.

2. В пределах акватории Невской губы и Сестрорецкого Разлива выделены палеодолины двух физико-геологических типов. Различия, обусловленные характером формирования врезов и условиями осадконакопления в ледниковые, межледниковые и послеледниковый периоды, закономерно проявляются в геофизических полях.

3. Система палеодолин акватории Невской губы и ее береговой зоны характеризуются развитием единой взаимоувязанной системы глубоких (до 110 м) врезов в дочетвертичных отложениях, заполненных четвертичными отложениями преимущественно ледникового и водноледникового генезиса, в составе которых выделяется основной канал (магистральный) и его притоки, различающиеся условиям и последовательностью формирования.

4. Палеодолины региона представляют потенциальную геоэкологическую опасность при освоении территорий или акваторий, их положение необходимо учитывать при проектировании и проведении инженерных работ. Места развития погребенных врезов второго типа являются зонами повышенной геоэкологической опасности из-за возможности развития плывунов, а также высокого уровня загрязнения подземных вод, что делает их агрессивной средой для железобетонных конструкций.

5. Палеодолины второго типа являются перспективными источниками водоснабжения.

139

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного диссертационного исследования были сделаны следующие основные выводы:

1. Для составления интегральной картосхемы геоэкологического районирования восточной части Финского залива и прилегающей территории основными являются критерии, разработанные на основе анализа дочетвертичного палеорельефа и ключевых абиогенных элементов донных ландшафтов: геоморфологические условия, геологическое строение, экзогенные геологические процессы, экологическое состояние, газонасыщенность грунтов, техногенное воздействие. Выбор критериев обусловлен базовой ролью абиотических элементов донных ландшафтов, определяющих распределение биотопов, а также особенностями техногенного воздействия район исследования.

2. В акустических временных разрезах выделяются три акустических комплекса (АК), отложения которых обладают различными геотехническими свойствами отражающими различные условия формирования геологической среды в неоплейстоцен-голоценовый этап развития восточной части Финского залива. Породы и отложения АК1 характеризуются низкой пористостью и влажностью, высокой плотностью и устойчивостью, и являются грунтами пригодными для строительства. Отложения АК2, представленные ледниковоозерными глинами, для которых характерна сравнительно высокая влажность, пористость и пониженная плотность, являются непригодными для строительства. АК3 представленный полужидкими алевро-пелитовыми илами, которые обладают минимальными прочностными характеристиками, зачастую газонасыщены, а также являются депоцентрами для различных полютантов.

3. На мелководных акваториях залива и прилегающей территории Санкт-Петербурга с помощью оригинального (разработанного автором) комплекса геофизических методов геоэкологических исследований обнаружены и оконтурены палеодолины особенности их внутреннего строения.

4. Согласно результатам физико-геологического моделирования в региональной сети палеодолин существует девять структурно-вещественных комплексов (СВК), обладающих уникальным набором физических и литологических свойств, и обусловливающих различия во влиянии палеодолин различного типа на геоэкологические условия. Основные различия выявленных СВК обусловлены наличием вододнасыщенных песчаных отложений и уровнем загрязнения грунтовых вод.

5. В соответствие с построенной интегральной схемой геоэкологического районирования для 57% площади района исследования геоэкологическое состояние классифицируется как «относительно удовлетворительное» для хозяйственной деятельности. «напряженное» участки дна занимают 32% площади. Сюда относятся, прежде всего, бассейны седиментации, в которых происходит накопление алевро-пелитовых илов, являющихся средой накопления загрязнения. В естественных условиях седиментации эти зоны не представляют опасности, в то же время при техногенном воздействии (прокладка подводных коммуникаций, газопроводов, добыча железомарганцевых конкреций, дноуглубление, дампинг) здесь может возникнуть кратковременное негативное воздействие на окружающую среду. Также к потенциально опасным зонам относятся области интенсивного волнового размыва дна в пределах прибрежных мелководий и подводных поднятий. «Критические» зоны, неблагоприятные для хозяйственной деятельности, занимают 11% площади дна и пространственно приурочены к зонам развития газонасыщенных осадков и крутым склонам подводных поднятий.

6. Таким образом, на основе геоэкологического районирования с учетом роли погребенных палеодолин выявлены особенности пространственной дифференциация геологической среды восточной части Финского залива и прилегающих территорий, имеющие существенное значение для ее устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов, Н.А. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана / Н.А. Айбулатов, Ю.В. Артюхин. – СПб.: изд-во Гидрометеоиздат. – 1993. – 291 с.

2. Айбулатов, Н.А. Геоэкология шельфа и берегов России / Н.А. Айбулатов. – М.: изд-во Ноосфера. – 2011. – 428 с.

3. Айбулатов, Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии / Н.А. Айбулатов. – М.: изд-во Наука. – 2005. – 363 с.

4. Акимов, А.И. Адаптация морского фитопланктона к свету / А.И. Акимов, Д.В. Стельмах, Т. Чурилова [и др.] // Океанология. – 1992. – Т. 32. – №1. – С. 84-91.

5. Александрова, Л.В. Концепция системы подводного экологического мониторинга Финского залива и Ладожского озера / Л.В. Александрова, А.В. Митько // Известия ЮФУ: Техническое науки. – 2013. – №9(146). – С. 25-29.

6. Алешин, А.С. Сейсмическое районирование особо ответственных объектов / А.С. Алешин. – М.: Светоч Плюс. – 2010. – 304с.

7. Амантов, А.В., Буданов Л.М., Григорьев А.Г. и др. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2013 г. [Электронный ресурс] / А.В. Амантов, Л.М. Буданов, А.Г. Григорьев и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2014. – 136 с. Режим доступа: https://www.vsegei.ru/ru/public/info_marine/.

8. Амантов, А.В. Карта рельефа поверхности дочетвертичного рельефа: Геоэкологический атлас восточной части Финского залива / А.В. Амантов; под ред. В.М. Питулько, М.А. Спиридонова. – РАН, ВСЕГЕИ, МПР РФ. – СПб. – 2002. 50с.

9. Андреев, М.А. Геофизические исследования на озере Тишь / М.А. Андреев, Д.А. Зайцев, И.Н. Модин // Природа и история Поугорья. – Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой. – 2009. – Выпуск. 5. – С. 24-28.

10.Аппаратура разведочная многоэлектродная СКАЛА-48: Техническое описание и инструкцияпоэксплуатации[Электронный ресурс].–Режим доступа:https://geodevice.ru/upload/iblock/4ea/siber 48 instruction manual 14.pdf.

11. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. О. В. Петров. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 78 с.

12. Ауслендер, В.Г. Новое в геологии Санкт-Петербурга / В.Г. Ауслендер [и др.] // Минерал. – №1(4). – 2002. – С. 51-58.

13. Ауслендер, В.Г. Отчет о комплексном геологическом, гидрогеологическом и инженерногеологическом доизучении масштаба 1:50000 с общими поисками и геоэкологическим картированием территории г.Санкт-Петербурга и его окрестностей / В.Г. Ауслендер [и др.]. – 2001. 556с.

14. Барков, Л.К. Характеристика взвеси и процессы современного осадкообразования в восточной части Финского залива / Л.К. Барков, А.В. Бурдаков, Е.М. Щербаков // Вест. ЛГУ: Сер.7. – Л. – 1986. – Вып. 1. – С. 12-19.

15. Белов, Д.М. Эффективность работы берегозащитных сооружений восточной части Финского залива / Д.М. Белов // XIX Международная конференция: «Современные проблемы изучения берегов». Тезисы докл. – СПб. – 1995. – 27 с.

16. Бобачев, А.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтальнонеоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ "Геоинформмарк". – 1996. – Выпуск 2. – 50 с. 17. Бондаренко, С.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации: Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение): Серия Чукотская: Лист R-1, 2 – остров Врангеля / С.А. Бондаренко, В.А. Виноградов, Ю.В. Горячев [и др.] // Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2014. – 144 с.

18. Буданов, Л.М. Применение методов гидроэлектразведки для картирования форм палеорельефа акватории «Сестрорецкий Разлив» / Л.М. Буданов, В.В. Глазунов, А.Ю. Сергеев, Н.Н. Ефимова // Естественные и технические науки. – 2017. – № 3. – С. 52-57.

19. Буданов, Л.М. Применение комплекса геофизических методов для уточнения геологического строения донных отложений Сестрорецкого разлива / Л.М. Буданов, В.В. Глазунов, А.А. Московцев, Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского. – 2017. С. 514-515.

20. Буданов, Л.М. Картирование погребенных долин в пределах акватории озера Сестрорецкий Разлив по данным комплексных гидрогеофизических исследований / Л.М. Буданов, В.В. Глазунов, А.Ю. Сергеев, Ю.П. Кропачев // Материалы конференции «13th Conference and Exhibition «Engineering Geophysics 2017». – 2017. – С. 190-198.

21. Буданов, Л.М. Изучение современных и реликтовых береговых форм восточной части Финского залива методом георадиолокации / Л.М. Буданов, А.Ю. Сергеев, И.А. Неевин, А.А. Московцев. // Материалы конференции «14th Conference and Exhibition «Engineering and Mining Geophysics 2018». [Электронный ресурс]. Режим доступа – http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=91734.

22. Буданов, Л.М. Ключевые этапы геологического развития восточной части Финского залива в позднем неоплейстоцене-голоцене на основе анализа архивных данных непрерывного сейсмоакустического профилирования / Л.М. Буданов, А.Ю. Сергеев, Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда // 15-ая научно-практическая конференция "Инженерная и рудная геофизика 2019" Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г. (EAGE Engineering and Mining Geophysics 2019). [Электронный ресурс]. Режим доступа – http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96824

23. Буданов, Л.М. Результаты морских геофизических исследований в восточной части Финского залива. / Л.М. Буданов, Ю.П. Кропачев, И.А. Неевин, А.Ю. Сергеев // Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана». – 2014. – С. 38-40.

24. Бутылин, В.П. Анализ изученности загрязненности донных отложений с обобщением имеющихся данных / В.П. Бутылин // Отчет по договору №027. АО ФИП, 1992. – 23 с.

25. Волохин, В.А. Методические рекомендации по использованию гидролокатора бокового обзора при геологических исследованиях на шельфе / В. А. Волохин, Ю. Н. Губанво, М. Н. Ибрае, М. Г. Нечаев, Д. Ф. Такки. – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1985. – 52 с.

26. Воронкевич, С.Д. Инженерная геохимия с основами геохимии техногенеза / С. Д. Воронкевич. – Москва: Геомаркетинг, 2011. - 479 с.

27. Гайнанов, В.Г. Сейсмоакустический комплекс для двухчастотного профилирования на акваториях / В. Г. Гайнанов, А. С. Зверев // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 4. – С. 649-653.

28. Гайнанов, В.Г. Сейсморазведка / В.Г. Гайнанов. – М.: изд-во МГУ. – 2006. – 148 с.

29. Геологический атлас Санкт-Петербурга. – СПб.: изд-во Комильфо. – 2009. – 57 с.

30. Геология Балтийского моря / под ред. В.К. Гуделиса, Е.М. Емельянова. – Вильнюс: изд-во Мокслас. – 1976. – 370 с.

31. Геология Финского залива / под ред. А. Раукаса, Х. Хюваринена. – Таллинн: изд-во АН Эстонии. – 1992. – 422 с.

32. Геохимия осадочного процесса в Балтийском море / под ред. Е.М. Емельянова, В.Н. Лукашина. – М.: изд-во Наука. – 1986. – 228 с.

33. Головин, И.В. Отчет о поисковых работах, проведенных кембрийской партией № 20 в окрестностях Ленинграда, в южной части Карельского перешейка и по южному побережью Финского залива. 0-34, 0-35, Лен.обл. Западная часть участка. 1960 г., инв.№ 17560.

34. Головина, Е.А. Отчет по теме № 164 Разработка методики высокоточной гравиметрической съемки и магнитометрии с целью поисков структур для газохранилищ в условиях неглубокого залегания кристаллического фундамента в ЛЭР. Восточная часть листа 0-35 / Е.А. Головина, В.В. Гавриловский. – Ленинградская область. 1966 г., инв.№ 195525.

Г.Д. 35. Горелик Опыт применения малоглубинных многоканальных сейсмических исследований МОВОСТ для уточнения внутренней структуры погребенной палеодолины / Горелик Г.Д., Буданов Л.М. // 15-ая научно-практическая конференция "Инженерная и рудная геофизика 2019" Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г. (EAGE Engineering and Mining Geophysics 2019). [Электронный pecypc]. Режим доступа http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96757

36. Горная энциклопедия. Том 5. СССР / Е.А. Козловский (ред.). – Издание: Советская энциклопедия, Москва, 1991. – 541 с.

37. Давыдова, О.А. Физико-химические аспекты миграционных процессов тяжелых металлов в природных водных системах / О.А. Давыдова, Е.В. Коровина, Е.С. Ваганова [и др.] // Вестник Южно-Уральского Государственного университета: Серия «Химия». – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 40– 50.

38. Дашко, Р.Э. Ретроспективный анализ экологического состояния подземного пространства Санкг-Петербурга / Р.Э. Дашко, Л.П. Норова, Е.С. Руденко //Сборник научных трудов «Наука в Санкт-Петербургском государственном горном институте (ТУ)». СПб,1998, вып.2.-с.89-100.

39. Дашко, Р.Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга/ Р.Э. Дашко [и др.] // Развитие Городов И Геотехническое Строительство. – 2011. – Выпуск №1. – С. 1-47.

40. Дмитриев, А.А. Отчет о предварительной разведке подземных вод для водоснабжения нежилой зоны пос. Белоостров Сестрорецкого района г. Ленинграда 1979-1981 гг. / А.А. Дмитриев. 1981 г., инв.№ 23967.

41. Доброхотова, И.А. Электроразведка / И.А. Доброхотова, К.В. Новиков. – М.: изд-во РГГРУ. – 2009. – 54 с.

42. Донченко, В.К. Эколого-геохимические особенности прибрежных акваторий / В.К. Донченко, В.В. Иванова, В.М. Питулько. – СПб: изд-во НИЦЭБ РАН. – 2008. – 341 с.

43. Дортман, Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Н.Б. Дортман // Справочник геофизика. – М.: изд-во Недра. – 1984. – 455 с.

44. Ермохин, К.М. Аналитическое продолжение геофизических полей методом цепных дробей / К.М. Ермохин // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 238-241.

45. Жигульский, В.А. Принципы адаптивного управления качеством морской среды г. Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] / В. А. Жигульский // Научно-практическая конференция: «Проблемы градостроительной экологии в условиях глобальных и региональных изменений окружающей среды». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gugenplan.spb.ru/UserFiles/VAG.pdf.

46. Журухин, И. Характер отложений наносов в русле Санкт-Петербургского морского канала и меры к их устранению / И. Журухин. – СПБ.: Изд-во Собр.инст.пут.сообщ., 1894. – 72 с.

47. Иванов, В.А. Загрязнение мирового океана / В.А. Иванов, К.В. Показеев, Е.Е. Совга. – МАКС Пресс М, 2006. – 164 с.

48. Зайцев, В.М. Оценка экологического состояния подводных отвалов грунта в Невской губе / В.М. Зайцев, К.А. Клеванный, С.В. Лукьянов [и др.] // Инженерные изыскания. – 2010. – №5. – С. 36-42.
49. Зинченко, В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных / В.С. Зинченко. – Изд-во АИС. – 2005. – 385 с.

Зубенко, Ф.С. Природная и антропогенная динамика берегов восточной части Финского / Ф.С. Зубенко // XIX Международная конференция «Современные проблемы изучения берегов»: Тезисы докл. – СПб. – 1995. – С. 52-54.

51. Измеритель Многоканальный Поляризации Вызванной «ИМВП» Инструкция по эксплуатации редакция 1.4 [Электронный pecypc]. Режим доступа https://geodevice.ru/upload/iblock/412/IMVP-8 manual-ru.pdf.

52. Израэль, Ю.А. Антропогенная экология океана / Ю.А. Израэль, А.В. Цыбано. – М.: изд-во Наука. – 2009. – 532 с.

53. Инструкция по гравиметрической разведке. – М.: изд-во Недра. – 1975. – 88 с.

54. Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 200 000. – М.: Роскомнедра. – 1995. – 244 с.

55. Информационный бюллетень №11: Состояние геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Баренцева, Белого и Балтийского морей. – СПб.: изд-во ФГУНПП «Севморгео». – 2009. – 34 с.

56. Информационный бюллетень №9: Состояние геологической среды континентального шельфа Балтийского, Белого и Баренцева морей. – СПб.: изд-во ФГУНПП «Севморгео». – 2007. – 55 с.

57. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2011 г. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 80 с.

58. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2012 г. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. – 112 с.

59. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2013 г. Авт.: Амантов А.В., Буданов Л.М., Григорьев А.Г. и др. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 136 с.

60. Ипатова, С.В. Качество морских вод и донных отложений восточной части Финского залива по данным мониторинга ФГБУ «Северо-Западное УГМС» [Электронный ресурс] / С.В. Ипатова // Конференция: "Специализированное обеспечение информацией о состоянии и загрязнении окружающей среды в больших городах": Тезисы докл. – Ярославль. – 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://oceanography.ru/index.php/component/jdownloads/finish/41/1682.

61. Квасов, Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы / Д.Д Квасов. – Л.: изд-во Наука. – 1975. – 278 с.

62. Кийко, О.А. Результаты локального экологического мониторинга района строительства Комплекса по перегрузке технической серы в Лужской губе / О.А. Кийко, С.М. Усенков, И.А. Стогов [и др.] // Тр. Межд. экологического форума: «День Балтийского моря». – СПб.: Издательский дом Герда. – 2008. – С. 124-128.

63. Ковалева, О.А. Особенности развития береговой зоны восточной части Финского залива: результаты мониторинг экзогенных геологических процессов / О.А. Ковалева, Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда, А.Ю. Сергеев, Л.М. Буданов // Антропогенная трансформация геопространства: история и современность: материалы III Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 177-185.

64. Кочетков, М.В. Концепция геоэкологического картографирования / М.В. Кочетков, Г.С. Вартанян, М.С Голицын // Разведка и охрана недр. – 1998а. – №6. – С. 10-12.

65. Кочетков, М.В. Современное состояние геоэкологического картирования в России / М.В. Кочетков, В.А. Грабовников, Л.В. Лерненко // Разведка и охрана недр. – 1998б. – №6. – С. 7-10.

66. Кочеткова, Е.С. Валидация регионального алгоритма для определения концентрации хлорофилла А в Восточной части Финского залива по данным спутниковых измерений / Е.С. Кочеткова, А.В. Исаев, Т.Р. Еремина // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – № 47. – С. 43-48.

67. Кулинич, А.В. Отчет о результатах работ Невельской гравиразведочной партии за 1966 г. мб 1:200000 / А.В. Кулинич, И.А. Похтель. 1967 г., инв.№ 19988.

68. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Издание 2. – Л.: изд-во Недра. –1984. – 511 стр.

69. Лаппо, А.Д. Эколого-ориентированный подход к территориальному и морскому пространственному планированию / А.Д. Лаппо, Э.А. Миленина // Региональная геология. – 2014. № 1-2 (35). – С. 134-140.

Ласточкин, А.Н. Рельеф и новейшая история северного шельфа Евразии / А.Н. Ласточкин,
 Б.Г. Федоров // Геоморфология. – 1978. – № 3. – С. 26-32.

71. Левин, Г.М. Отчет о геофизических работах Вуоксинской партии за 1958 г. 0-36-1; 0-36-г / Г.М. Левин. – Ленинградская область. 1958 г., инв.№ 15976.

72. Леонтьев, И.О. Бюджет наносов и прогноз развития берега / И.О. Леонтьев // Океанология. – 2008. – Т. 48. – С. 467-476.

73. Липатникова, О.А. Формы нахождения микроэлементов в донных отложениях Иваньковского водохранилища / О.А. Липатникова, Д.В. Гричук, И.Л. Григорьева [и др.] // Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2014. – № 1. – С. 37–48.

74. Логвиненко, Н.В. Литология и литодинамика современных осадков восточной части Финского залива/ Н.В. Логвиненко, Л.К. Барков, С.М. Усенков. – Л.: изд-во ЛГУ. – 1988. – 148 с.

75. Логвиненко, Н.В. Некоторые особенности минералогического состава донных осадков восточной части Финского залива/ Н.В. Логвиненко, Л.К. Барков, С.М. Усенков // Вест. ЛГУ: Сер.7. – Л. – 1980. – № 12. – С. 9-17.

76. Лоция Балтийского моря: Ч.1: Восточная часть моря с Финским и Рижским заливами. – Л.: изд-во ГУМО. – 1979. – 540 с.

77. Максимов, А.А. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря / А.А. Максимов // Океанология. – 2006. – Т. 46, . – №2. – С. 204–210.

78. Малаховский, Д.Б. О генезисе и возрасте переуглублений на Севере Европы/ Д.Б. Малаховский Б.Г. Федоров // Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. – М.: изд-во Наука. – 1984. – С. 134-140.

79. Малов, Н.Д. О причинах аварии в Петербургском метро / Н.Д. Малов // Минерал. – 1999. – №2(3). – С. 44-47.

80. Маловицкий, Я.П. Морские геофизические исследования / Я.П. Маловицкий [и др.]. – М.: изд-во Недра. – 1977. – 375 с.

81. Мартынова, Т.В. Отчет о результатах опережающей аэромагнитной съемки масштаба 1:50000 и дистанционных съемок масштаба 1:100000 на акватории Финского залива и прилегающих участков суши в 1990-1993 г., 1994 г. Листы Р-35- ХХХҮІ, 0-35-ҮІ (оба полностью) / Т.В. Мартынова. 1994 г., инв.№ 26436.

82. Матвеев, В.С. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии: Методическое руководство / В.С. Матвеев, В.Н. Чубаров, Г.Я. Черняк [и др.]. – М.: изд-во Недра. – 1985. – 84 с.

83. Методические рекомендации по составлению эколого-геологических карт масштаба 1:1 000 000-1:500 000: Сводная легенда и макеты / Л.А. Островский, В.Н. Островский, Р.К. Шахнова. – М. – 1994. – С. 107.

84. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третьего поколения): Версия 1.3. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2017. – 169 с.

85. Минаков Е.П. Исследования состояния поверхностных вод восточной части Финского залива на основе спутниковой информации/ Е.П. Минаков, Е.Ф. Чичкова, Л.А. Морозов // Сборник тезисов Шестой Всероссийской конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М. – 2008. – С. 208-212.

86. Москаленко П.Е., Федоров С.М. Морские геологоразведочные работы масштаба 1: 200 000 на листах P-35-XXXVI, 0-35-V, VI O-36-I (все частично). Отчет по объекту "Кронштадтский". СПб, фонды ВСЕГЕИ, 1995.

87. Некрасов, А.В. Гидрофизические процессы / А.В. Некрасов, Т.Р. Еремина, П.П. Провоторов // Финский залив в условиях антропогенного воздействия. – СПб.: изд-во АН РФ. – 1999. – С. 5-47

88. Николаева, Т.Н. Инженерно-геологическая оценка особенностей строения древней долины на севере Санкт-Петербурга / Т.Н. Николаева, Л.П. Норова // Грунтоведение. – 2012. – №1. – С. 44-52.

89. Огильви, А.А. Основы инженерной геофизики / А.А. Огильви. – М.: изд-во Недра. – 1990. – 502 с.

90. Окнова, Н.С. К вопросу изменения донных осадков Невской губы в связи со строительством дамбы / Н.С. Окнова, С.К. Лопатина, Н.Н. Верзилин [и др.] // Вестник ЛГУ: Геология, география. – СПб. – 1990. – Вып. 3. – С. 12-20.

91. Орлова, М.И. Особенности пространственной изменчивости абиотических элементов подводных ландшафтов и поселений макробеспозвоночных северной береговой зоны восточной части Финского залива / М.И. Орлова, Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда, И.А. Неевин, А.Ю. Сергеев // Региональная геология. – 2014. – № 1-2 (35). – С. 29-38.

92. Орлова, М.И. Мониторинг чужеродных видов Невской губы и восточной части Финского залива / М.И. Орлова // Окружающая среда Санкт-Петербурга. – 2017. – №3(5). – С. 45-55.

93. Орлова, М.И. Модельные участки проекта Топконс – природные особенности и антропогенные воздействия / М. И. Орлова, Д. В. Рябчук, Л. Л. Сухачева, Н. Б. Останин, А. Ю. Сергеев, Л. М. Буданов, И. А. Неевин, В. А. Жамойда // Региональная экология. – 2015. – № 3 (38). – С. 32-48.

94. Неевин, И. А. Геолого-геофизические методы как источник базовой информации для последующих биологических исследований и картирования подводных ландшафтов / И. А. Неевин, Л. М. Буданов, А. Ю. Сергеев, Д. В. Рябчук, В. А. Жамойда, О. В. Дронь // Региональная экология. – 2015. – №4 (39). – С. 5-24.

95. Осадкообразование в Балтийском море / под. ред. А.П. Лисицына, Е.М. Емельянова – М.: Наука. – 1981. – 248 с.

96. Пель, Н.В. Результаты изысканий произведенных в 1885 и 1886 годы в устье р.Большой Невы / Н.В. Пель // Мат. для опис.рус.портов и история их сооружения. – 1988. – Вып. 7. – С.3-26.

97. Поляк, Ю.М. Мониторинг Финского залива Балтийского моря: Влияние антропогенных факторов на биохимические процессы в прибрежной зоне / Ю.М. Поляк, Ю. И. Губелит, Т. Д. Шигаева [и др.] // ПЭММЭ. – 2018. – №2. – Т. 29. – С. 99-116.

98. Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации ZONDRes2D: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://geodevice.ru/upload/iblock/846/ZondRes2D.pdf.

99. Руководство пользователя RadExPro 2016.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://radexpro.com/wpcontent/uploads/2016/09/RU_RadExPro2016.1_manual.pdf.

100. Рухина, Е.В. О характере дочетвертичного рельефа Ленинградской области и Прибалтики / Е.В. Рухина // Учен. зап. ЛГУ. – 1946. – № 9. – с. 18-25.

101. Рыбалко, А.Е. Обработка и интерпретация материалов локации бокового обзора для определения вещественного состава поверхностных образований шельфа / А.Е. Рыбалко, Ю.П. Кропачев, П.Е. Москаленко, М.А. Спиридонов. – Л.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1989. – 46 с.

102. Рябчук, Д.В. Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов/ Д.В. Рябчук, А.М. Колесов, А.Ю. Сергеев [и др.] // Геоморфология. – 2012. – № 4. – С. 99-105.

103. Рябчук, Д.В. Седиментационые процессы в послеледниковых водоемах по данным исследований донных отложений восточной части Финского залива / Д.В. Рябчук, А.Г. Григорьев, Т.В. Сапелко, В.А. Жамойда, А.Т. Котилайнен, А.Ю. Сергеев, Л.М. Буданов // Известия РГО. – 2017. – Т. 149 (3). – С. 32-52.

104. Рябчук, Д.В. Динамика седиментационных процессов в Невской губе (Финский залив) под воздействием техногенных факторов / Д.В. Рябчук, Е.Н. Нестерова, В.А. Жамойда, А. Котилайнен, Г. Валлиус, Л.Л. Сухачева, М.А. Спиридонов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 35. – С. 102-118.

105. Рябчук, Д.В. Проблемы абразии берегов восточной части Финского залива: состояние, прогноз, рекомендации по берегозащите / Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, О.А. Ковалева, И.О. Леонтьев, В.А. Жамойда, А.М. Колесов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 187-203.

106. Свиридов, Н.И. Рельеф дочетвертичной поверхности Балтийского региона / Н.И. Свиридов, В.М. Литвинов, А.И. Гайгалис [и др.] // Сов. геология. – 1976. – № 5. – С. 60-65.

107. Сергеев, А.Ю. История геологического развития Куршской косы и голоцене и современные литодинамические процессы в береговой зоне: автореф. дис. канд. г.-.м наук: по специальности 25.00.01 – региональная геология/ Сергеев Александр Юрьевич. – СПб, 2015. – 25 с.

108. Сергеев, А.Ю. Корреляция георадарных данных для определения погребенных голоценовых береговых линий, образованных в ходе изменения уровня Балтийского моря [Электронный ресурс] / А.Ю. Сергеев, Л.М. Буданов, Д.В. Рябчук, В.А. Жамойда, И.А. Неевин // 15-ая научно-практическая конференция "Инженерная и рудная геофизика 2019" Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96733

109. СП 11-105-97: Инженерно-геологические изыскания для строительств: Часть VI: Правила производства геофизических исследований // Госстрой России. – М.: Производственный инаучноисследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России. – 2004.

110. Спиридонов, М.А. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов/ М.А. Спиридонов, Д.В. Рябчук, К.К. Орвику [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 41. – С. 107-118.

111. Спиридонов, М.А. Ледниковая история Финского залива/ М.А. Спиридонов // Геология субаквальной части зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты в пределах Финского залива: Сб.науч.трудов. – Л.: изд-во ВСЕГЕИ. – 1989. – с.23-32.

112. Спиридонов, М.А. Невская губа: Эколого-геологический очерк / М.А. Спиридонов, Д.В. Рябчук., В.А. Шахвердов [и др.]. – СПб.: изд-во «Литера». – 2004. – 181 с.

113. Субетто, Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции / Д.А. Субетто. – СПб.: изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. – 2009. – 344 с.

114. Сухачева, Л.Л. Исследование изменчивости берегов восточной части Финского залива на основе ретроспективного анализа данных аэро- и космических съемок / Л.Л. Сухачева, Е.И. Кильдюшевский // Сборник тезисов VII Международного экологического форума «День Балтийского моря». – СПб. – 2006. – С. 254-256.

115. Сухачева, Л.Л. Экологические и другие аспекты дреджинга при реализации крупных инженерных проектов в восточной части Финского залива: Обобщение данных многолетних аэрокосмических наблюдений / Л.Л. Сухачева // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 35. – С. 124-132.

116. Сухачева, Л.Л. О применении результатов спутниковых наблюдений восточной части Финского залива для оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на состояние акватории и биотических компонентов экосистемы / Л.Л. Сухачева, М.И. Орлова // Региональная геология. – 2014. – № 1-2 (35). – С. 62-76.

117. Трофимов, В.Т. Концептуальные основы эколого-геологического картографирования: Тезисы докладов / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг // Геоэкологическое картирование. – М.: ВСЕГИНГЕО. – 1998. – С. 15-18.

118. Федоров, Б.Г. Возможности и перспективы геоакустики при исследованиях нефтегазоносных акваторий / Б.Г. Федоров // Методика геолого-геоморфологических исследований нефтегазоносных областей. – 1977. – С. 51-62.

119. Холмянский, М.А. Современное состояние и прогноз развития морских геоэкологических исследований / М.А. Холмянский, Е.М. Снопова, М.В. Владимиров [и др.] // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – № 48. – С. 216-233.

120. Шалаева, Н.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях / Н.В. Шалаева, А.В. Старовойтов. – М.: изд-во МГУ. – 2010. – 254 с.

121. Шахвердов, В.А. Новая карта эколого-геологического районирования восточной части Финского залива и его береговой зоны. Геология в школе и вузе: Геология и цивилизация / В.А. Шахвердов; под ред. Е.М. Нестеровой // Материалы конференции. – СПб.: изд-во РГПУ им .А.П. Герцена. – 2009. – Т. 1. – 344 с.

122. Шахвердов, В.А. Основные факторы эколого-геологического районирования восточной части Финского залива и его береговой зоны. Геоэкологические проблемы современности / В.А. Шахвердов; под ред. И.А. Карловича // Доклады 3-й Международной конференции. – Владимир: изд-во ВГГУ. – 2010. – С. 331-333.

123. Шахвердов, В.А. Тяжелые металлы (Cr, Ni, Co, Pb, Hg и др.) как индикаторы антропогенного загрязнения донных осадков в Невской губе. / В.А. Шахвердов // Тез. докладов Годичной сессии Мин. общества РАН: «Проблемы экологической минералогии и геохимии». – СПб. – 1997. – С. 82-124. Шевнин, В.А. Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений / В.А. Шевнин // Геофизика. – 2006. – №4, 2006. – С. 37-43.

125. Шишкин, М.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение): Серия Южно-Карская: Лист R-41 – Амдерма / М.А. Шишкин, С.И. Шкарубо, Е.В. Молчанова [и др.] // Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2012. – 383 с.

126. Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы/ под ред. А.Ф. Алимова, С.М. Голубкова. – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2008. – 477 с.

127. Ядута, В.А. Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области [Электронный ресурс] / В.А. Ядута // Минерал. – 2006. – №1. [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.mineral-journal.ru/Article/yaduta.htm

128. Andren T., Bjork S., Andren E., Conley D., Zillen L., Anjar J. The development of the Baltic Sea basin during last 130 ka. In: Jan Harff, Svante Björck, Peer Hoth (Editors). The Baltic Sea Basin, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011, pp. 75-98.

129. CG-5 Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2017/02/CG-5-Manual-Ver 8.pdf.

130. Erlingsson, U. Geomorphological development of the bottoms off Österlen, southernmost Sweden. 1990,136p. UNGI Rapport 76, ISSN 0375-8109.

131. Jørgensen F., Sandersen P. Mapping of buried tunnel valleys in Denmark: new perspectives for the interpretation of the Quaternary succession. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, vol. 15, pp. 33–36.

132. Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. et al. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction. DATED-1. Boreas 45. 2016. P. 1–45.

133. Kalm V., Raukas A., Rattas M., Lasberg K. Pleistocene glaciations in Estonia / Eds. P.L. Gibbard,
P.D. Hughes // Quaternary Glaciations – Extent and Chronology: a closer look. Developments in
Quaternary Science. Vol. 15. 2011. Elsevier, Amsterdam. – P. 95–104.

134. Kaskela, A. M., Rousi, H., Ronkainen, M., Orlova, M., Babin, A., Gogoberidze, G., Kostamo, K., Kotilainen, A.T., Neevin, I., Ryabchuk, D., Sergeev, A., Zhamoida, V. (2017). Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: The role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems. Continental Shelf Research, 142, 1-13.

135. Kirsch R., Rumpel H-M., Scheer W., Wiederhold H. Groundwater Resources in Buried Valleys: a challenge for geosciences. Hannover, Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut), 2006, 299 p.

136. Kotilainen A., Vallius H., Ryabchuk D. Seafloor anoxia and modern laminated sediments in coastal basins of the Gulf of Finland, Baltic Sea. Geological Survey of Finland, Special Paper. 2007, vol. 45, pp.47-60.

137. Loke M. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method [Электронный pecypc]. – Режим доступа: http://www.geotomosoft.com/r2dimanu.zip.

138. Mads Husse, Holger Lykke-Anderson. Overdeeped Quatearnary valleys in the eastern Danish North Sea: morhpology and origin. Quatearnary Science Reviews, 2000, vol. 19, pp. 1233-1253.

139. Orlova M., Ryabchuk D., Ezhova E., Evdokimenko A., Neevin I., Kobik L., Sukhacheva L., Bubnova E., Budanov L., Kocheshkova O., Krek A., Molchanova N., Sergeev A., Zhamoida V. Case studies of geo- and biodiversity of underwater landscapes in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea): is anything interesting across brackishwater lightless areas// Annual conference "GeoHab 2019 – Marine Geological and Biological Habitat Mapping": Abstracts (May 13–17, 2019, St. Petersburg, Russia). – SPb.: VSEGEI Press, 2019, pp. 148-149.

140. Ryabchuk D., Zhamoida V., Amantov A., Sergeev A., Gusentsova T., Sorokin P., Kulkova M., Gerasimov D. Development of the coastal systems of the easternmost Gulf of Finland, and their links with

Neolithic-Bronze and Iron Age settlements. In: Harff J., Baile G., Luth F. (editors). Geology and Archaeology: Submerged Landscapes of the Continental Shelf. Geological Society, London, Special Publications, 2016, 411 p.

141. Ryabchuk D., Vallius H., Zhamoida V., Kotilainen A., Rybalko A., Malysheva N., Deryugina N., Sukhacheva L., 2017. Pollution history of Neva Bay bottom sediments (eastern Gulf of Finland, Baltic Sea). Baltica. Vilnius, 2017, vol. 30(1), p. 31–46.

142. Ryabchuk D., Sergeev A., Krek A., Kapustina M., Tkacheva E., Zhamoida V., Budanov L., Moskovtsev A., Danchenkov A. Geomorphology and Late Pleistocene–Holocene Sedimentary Processes of the Eastern Gulf of Finland. Geosciences, 2018, vol. 8, 102 p. [Электронный ресурс]. URL: http://www.mdpi.com/2076-3263/8/3/102

143. Ryabchuk D., Zhamoida V., Sergeev A., Kovaleva O., Nesterova E., Budanov L. The coastal erosion map for different climate change scenarios. Compilation – methodology and results. ENPI CBC 2007 – 2013 Russia-South Eastern Finland. Climate Proof Living Environment (CliPLivE) Project report. St. Petersburg, 2015, 28 p.

144. Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Gerasimov D.V., Kriiska A., Nordqvist K., Budanov L.M., Kovaleva O.A., Zhamoida V.A., Anisimov M.A., Terekhov, A.V. New data on the postglacial development of Narva-Luga Klint Bay (eastern Gulf of Finland): Results of geoarchaeological research // Journal of Coastal Conservation. 2018. Pp.1–20.

145. Schlumberger C. Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol. Gaultier-Villars et Cie. Paris, 1920, 94 p.

146. The Gulf of Finland assessment. In: Raateoja M., Setälä O. (editors). Reports of the Finnish Institute, 2016, vol. 27, 363 p.

147. Vallius H. Recent sediments of the Gulf of Finland: an environment affected by the accumulation of heavy metals. PhD Thesis, Åbo Academi University, Turku, 1999, 111 p.

148. Vallius H., Zhamoida V., Kotilainen A., Ryabchuk D. Seafloor desertification - a future scenario for the Gulf of Finland? In: Harff J., Björck S., Hoth P. (editors) Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, 2011, p. 365-372.

149. Vallius H. Sediment geochemistry studies in the Gulf of Finland and the Baltic Sea: a retrospective view. Baltica, 2016, vol. 29, No. 1, p. 57-64.

150. Vallius H., Ryabchuk D., Kotilainen A., Spiridonov M., Suslov G., Zhamoida V. Pollution history of thr Neva Bay since the foundation of the city of S.Petersburg (1703 AD) // The Baltic Sea geology: The Ninth Marine Geological Conference. Extended abstracts. University of Latvia, Riga, 2006, P. 115-116.

151. Wijkmark N., Isæus M., Enhus C. Wave exposure calculations for the Russian coasts in the Baltic Sea. AquaBiota Report. 2013, vol. 11, 21 p.

152. Zhamoida V., Ryabchuk D., Sergeev A., Grigoriev A., Budanov L. Transformation of geological environment of the eastern Gulf of Finland and its coastal zone as a result of anthropogenic impact // International Scientific Forum «Gulf of Finland – natural dynamics and anthropogenic impact», devoted to 50th anniversary of Trilateral Gulf of Finland Co-operation: Abstracts (17-18 October 2018, St. Petersburg, Russia). – SPb.: VSEGEI Press, 2018. Pp. 90–92.