

Санкт-Петербургский государственный университет

КОБИК Любовь Богдановна

Выпускная квалификационная работа

Эколого-геологическая оценка подводных ландшафтов восточной части Финского залива

Направление *05.03.06 «Экология и природопользование»*

Основная образовательная программа бакалавриата *СВ.5024 «Экология и природопользование»*

Профиль *«Экология и недропользование»*

Научный руководитель:

Доц. каф. экологической геологии

к. г.-м. н. Беляев А.М.

Рецензент:

Зав. отделом Региональной геоэкологии и морской геологии,
Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского
(ВСЕГЕИ)

к. г.-м. н. Рябчук Д.В.

Санкт-Петербург

2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ	6
1.1 Физико-географическое описание	6
1.2 Геологическое строение	8
1.3 Геоморфология	10
1.4 Поверхностные отложения.....	13
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	14
2.1 Методика создания карты подводных ландшафтов для участка «Гогланд».....	14
2.2 Методика отбора проб донных осадков	15
2.3 Методика проведения рентгенофлуоресцентного анализа	18
2.4 Нормирование содержания загрязняющих веществ в донных осадках	20
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	26
3.1 Донные ландшафты исследуемого участка	26
3.2 Результаты определения валовых форм тяжелых металлов в донных осадках и их математико-статистическая обработка.....	27
3.2 Распределение тяжелых металлов в донных осадках подводных ландшафтов участка «Гогланд».....	31
3.3 Особенности загрязнения подводных ландшафтов с донной гипоксией	37
3.4 Геоэкологическое районирование дна участка «Гогланд»	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ	39
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЯ	45
Приложение 1	45
Приложение 2	48
Приложение 3	49

ВВЕДЕНИЕ

Финский залив, являющийся частью Балтийского моря, представляет собой одну из главных водных магистралей и акваторий северо-западной Европы. С экономической точки зрения Финский залив - акватория, по которой проходит важный торговый путь и на берегах которой находятся крупные порты - Санкт-Петербург, Хельсинки и Таллинн. Существование промышленно развитых территорий по берегам данного водного бассейна привело к развитию определенных экологических проблем. Одной из важнейших проблем в настоящее время является эвтрофикация, вызванная сбросами биогенных элементов объектами сельскохозяйственной отрасли. Тепловое воздействие оказывают сброшенные воды ЛАЭС (Ленинградской атомной электростанции) (Шахвердов и др., 2015). Интенсивное судоходство загрязняет поверхностные воды. Рельеф дна на ряде участков претерпел значительные изменения в результате добычи песчано-гравийного материала, дноуглубления и дампинга. Дно местами испещрено бороздами, оставшимися после активной добычи железомарганцевых конкреций, а в донных сообществах доминирующим видом стала *Marenzelleria arctica* – вид-вселенец, появившийся в Финском заливе вместе с грузовыми судами (Максимов, 2010). Наиболее распространенными загрязняющими веществами являются тяжелые металлы и нефтепродукты, а основной депонирующей средой являются донные осадки. Всё вышеперечисленное негативно влияет на состояние экосистем Финского залива, уменьшает их биоразнообразие и косвенно влияет на здоровье самого человека; делает актуальным комплексные исследования морских экосистем данной акватории.

Таким образом, Финский залив, характеризующийся относительной мелководностью и уникальностью биоты, обитающей в слабосоленых водах, становится весьма уязвимой акваторией ввиду высокой антропогенной нагрузки, для контроля за загрязнением и изменением которой необходимо использовать новейшие и в то же время эффективные методы.

Одним из таких методов является эколого-геологическая оценка подводных ландшафтов, представленная в данной исследовательской работе. Исследование донных ландшафтов - относительно новое направление в экологии. Одним из фундаментальных трудов, объединивших многолетние исследования в этой области, стала монография «Основы подводного ландшафтоведения» (Преображенский и др., 2000). Авторы рассматривают теоретическую и методологическую стороны исследования подводных донных ландшафтов. Также в данном труде затрагивается важная проблема трактовки ключевого термина «донный ландшафт», которая при современном развитии науки не

остаётся единой. В данной работе под донным ландшафтом понимается относительно однородный участок дна, для которого характерно единство взаимосвязанных компонентов: литогенной основы (донных осадков в пределах активного слоя или поверхности коренной породы), придонной водной массы и населяющих их морских организмов (Мануйлов, 1982). Из этого определения следует, что исследование подводных ландшафтов включает себя экологические, геологические, геофизические и гидрографические методы.

Выбранный объект исследования - Финский залив - изучается в рамках экологии и экологической геологии на протяжении многих лет. Большинство исследований можно классифицировать по цели работы на две группы: оценка загрязнения тяжелыми металлами и их распределение по дну акватории; влияние различных факторов (загрязнения, физических факторов среды) на живые организмы и их жизнедеятельность.

Донные осадки являются неотъемлемым компонентом водной среды. Они образуются в результате совокупности разнообразных климатических, гидрологических, механических, физических, химических, биологических и других процессов, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом водном объекте (Зиганшин, 2005). Для донных осадков характерна аккумуляция загрязняющих веществ, концентрация которых в донных осадках может значительно отличаться от концентрации в воде. В последствии донные осадки могут являться вторичными загрязнителями воды, именно поэтому так важно их изучение. В классической работе «Arsenic and heavy metal distribution in the bottom sediments of the Gulf of Finland through the last decades» (Vallius, 2012) рассматривается распределение тяжелых металлов (As, Zn, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, Ni, Hg) в донных осадках изучаемой территории, а также приводится сравнение их концентраций с концентрациями 1990-х гг. Автор приходит к выводу об уменьшении концентраций тяжелых металлов на 10-20% в связи с введением в Финляндии и Швеции более строгих нормативов на сбросы загрязняющих веществ.

Ключевым трудом для понимания динамики экосистем залива стала статья «Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: The role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems» (Kaskela et al., 2017). По результатам исследования влияния абиотических параметров среды авторы выделяют экологически значимые факторы, которые в дальнейшем используются как признаки для классификации донных ландшафтов.

Важное значение имел международный проект BALANCE (Al-Hamdani et al., 2007), целью которого стало картирование донных ландшафтов Балтийского моря на основе использования геологических, физических, гидрографических и химических параметров

среды. Полученные карты отражали экологически значимые характеристики среды, т.е. те характеристики, которые влияют на биоту и её распространение. Таким образом, ландшафтные карты стали важнейшим инструментом для экологической оценки территорий, однако они не учитывали антропогенное воздействие, проявляющееся, в частности, в загрязнении донных осадков, являющихся составным компонентом каждого ландшафта.

Целью данной работы является комплексное эколого-геологическое исследование донных ландшафтов восточной части Финского залива на примере участка в районе о. Гогланд.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Анализ физико-географических параметров восточной части Финского залива;
- Создание комплексной ландшафтной карты для исследуемого участка;
- Проведение рентгенофлуоресцентного анализа проб донных осадков на содержание в них тяжелых металлов;
- Анализ существующих методик экологического нормирования содержания загрязняющих веществ в морских донных осадках;
- Изучение распределения тяжелых металлов по ландшафтам;
- Создание карты распределения каждого из исследуемых элементов в донных осадках;
- Комплексная эколого-геологическая оценка участка в районе о. Гогланд.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Физико-географическое описание

Финский залив, являющийся восточной частью Балтийского моря, занимает площадь в 29 600 км² (Al-Hamdani et al., 2007). Российская часть залива составляет 11 000 км² от общей площади и включает в себя Выборгский залив на севере, Нарвский залив на юге, а также Невскую, Лужскую и Копорскую губы в восточной и юго-восточной частях Финского залива соответственно (Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря, 2010).

Акватория Финского залива находится в зоне сочленения Балтийского щита и Русской равнины. Финский залив является одним из наиболее мелководных участков Балтийского моря, которое в свою очередь отличается большой расчлененностью рельефа.

Финский залив характеризуется еще меньшей солёностью, чем слабосолёные воды Балтийского моря (рис.1). Это объясняется значительным влиянием на гидрологический режим крупных рек, впадающих в залив. Так воды Невской губы вплоть до Кронштадта по своим показателям определяются как пресные. К западу солёность увеличивается и в Лужской губе принимает значения 3-3,5 ‰ (Al-Hamdani et al., 2007). Таким образом, Финский залив можно отнести к олигохалинному I классу, характеризующемуся высоким содержанием пресноводных видов.

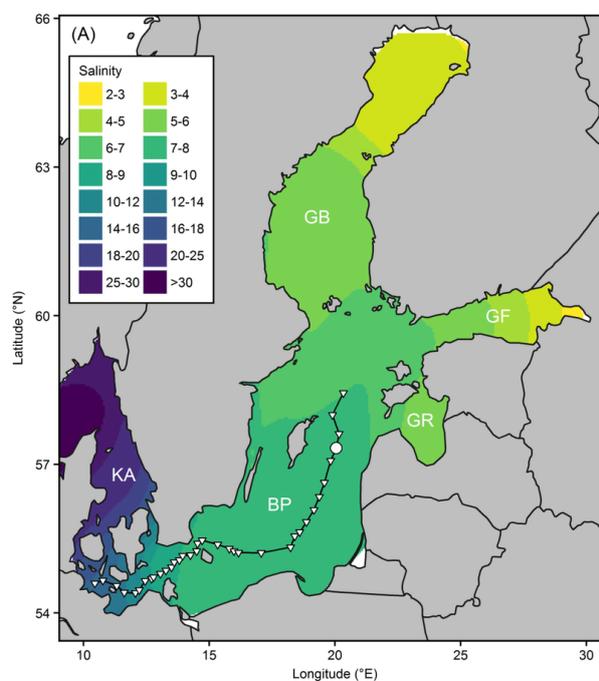
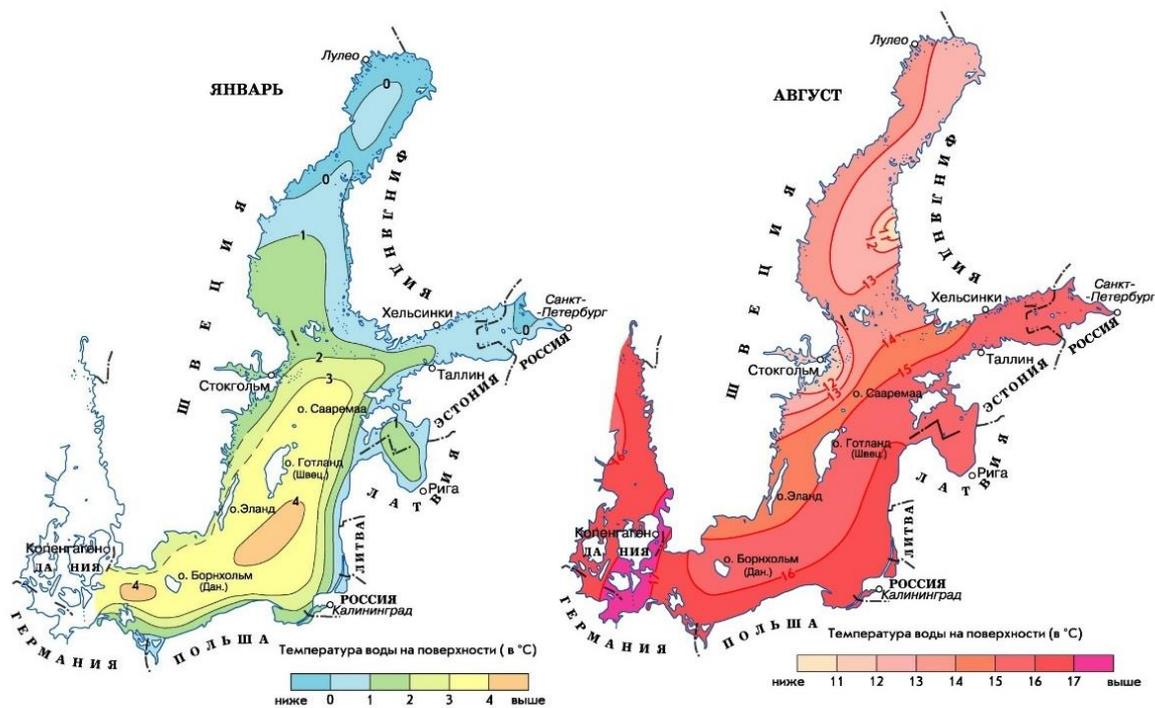


Рисунок 1. Солёность поверхностных вод Балтийского моря (Schneider and Müller, 2017)

В силу принадлежности к бореальному поясу Финскому заливу свойственны сезонные колебания температуры. Зимние значения температуры могут опускаться до 0°C, а летние – подниматься до 28-30°C (рис. 2). В вертикальной дифференциации вод залива выделяют три слоя: верхний изменчивый (0-20 м), холодный промежуточный (20-40 м) и глубинный относительно холодный (>40 м) (Сивков и др., 2014).



Масштаб 1:15 000 000

Рисунок 2. Температура воды на поверхности Балтийского моря (Национальный атлас России. Том 2 «Природа. Экология»)

Исследуемый участок находится в восточной части Финского залива в 1500 м к западу от острова Готланд (рис.3). Его площадь составляет 73 км².

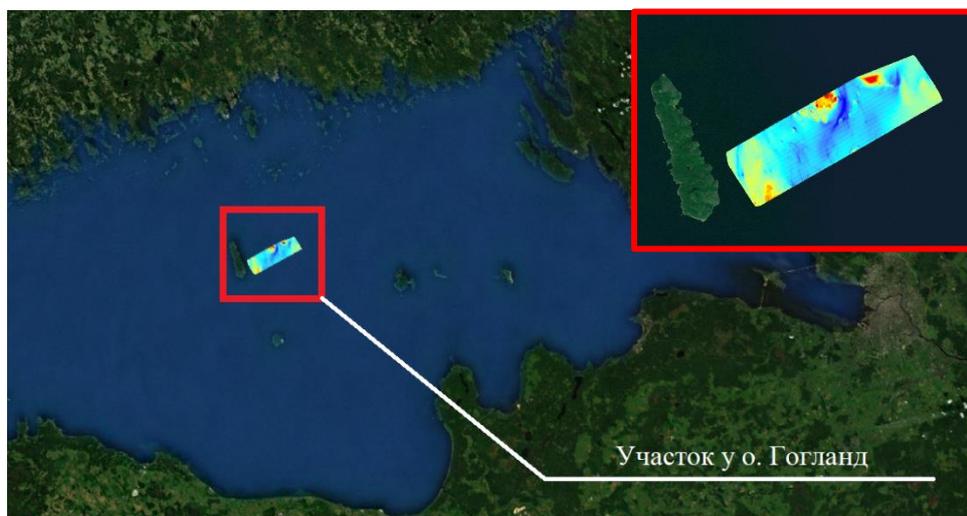


Рисунок 3. Расположение исследуемого участка, представленное на космоснимке

1.2 Геологическое строение

Балтийское море – молодая по геологическим меркам акватория. Его формирование началось в эпоху Эемского межледниковья около 130-115 тысяч лет назад (Harff et al., 2011). В четвертичное время площадь Финского залива неоднократно подвергалось воздействию оледенений, в результате которых происходила экзарация дна и частичное уничтожение более древних образований (Геология Балтийского моря, 1976). На протяжении последней валдайской ледниковой эпохи с достаточной уверенностью предполагается двухкратное превращение дна залива в ложе ледника (Спиридонов, 1989). Однако наличие доверхнеплейстоценовых образований на дне Финского залива лишь предполагается в наиболее глубоких эрозионных врезках, прямые же геологические данные об этих отложениях отсутствуют. Ледниковая история раннего валдая для Финского залива восстанавливается по разрезам прилегающей части суши (Спиридонова и др., 1967; Палеогеография Европы..., 1982; Четвертичное оледенение на территории СССР, 1987). Разрез четвертичных отложений северо-восточной части Финского залива, покрывающих дно залива практически сплошным чехлом, начинается ледниковыми отложениями, относящимися к карельской стадии валдайского оледенения.

16 тыс. лет назад начался этап развития Балтийского ледникового озера. Через 2 тысячи лет границы озера резко изменились по причине изостатического поднятия подводных порогов, и оно стало изолированным. В начале голоцена (11700 лет назад) уровень воды в озере резко понизился на 25 м. Эта фаза развития получила название Иольдиевого моря. Через 350 лет произошло изостатическое поднятие центральной Швеции, и равнинная территория бассейна обмелела, на смену солёным водам пришли пресные. Так началась эпоха Анцилового озера. В ходе своего постепенного развития в связи с поступлением солёных вод озеро преобразовалось в морскую акваторию - Литориновое море, отличающееся увеличенным количеством органики в воде. Полная смена пресных вод на солоноватые по разным источникам произошла 8,5 – 6 тыс. лет назад. Так начался современный этап развития Балтийского моря (Harff et al., 2011).

На рис. 4 представлены два сейсмических разреза послеледниковых отложений, полученных в ходе полевых работ ФГПУ «ВСЕГЕИ», локализующихся в западной части исследуемого участка «Гогланд». Исследуемый участок расположен в пределах Балтийского кристаллического щита, в зоне, где вследствие выветривания осадочных пород венда и кембрия на поверхность выходят протерозойские магматические породы, перекрытые четвертичными отложениями (Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря, 2010).

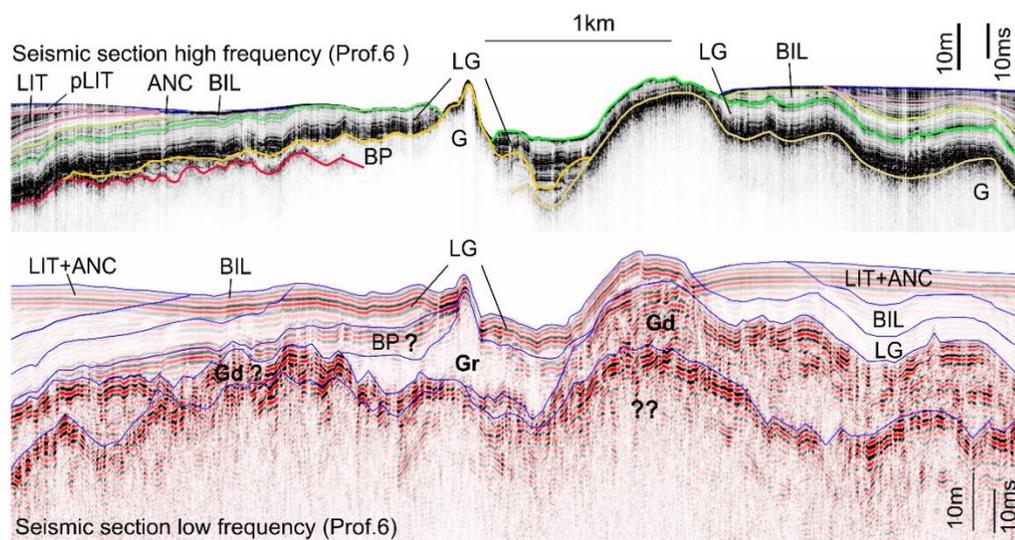


Рисунок 4. Сейсмический разрез послеледниковых отложений на участке "Гогланд" (составлены Л.М.Будановым, А.Ю.Сергеевым, ФГБУ «ВСЕГЕИ», Ryabchuk et al., 2020 (в печати))

Обозначения: G - морена, FG - флювио-гляциальные отложения, LG - ленточные глины, BIL - отложения Балтийского ледникового озера, BP - однородные отложения, ANC - озерные глины Анцилового озера, LIT - илы Литоринового моря, pLIT - илы постлиторинового периода, Gr - конечная морена, Gd - друмлины.

Линия G маркирует верхнюю границу отложенной морены. Это поверхность соответствует холмисто-западинному рельефу моренной равнины. Перепад высот составляет ок. 30 м. Сверху моренные отложения перекрываются ленточными глинами (LG), которые хорошо идентифицируются в сейсмическом профиле за счет их параллельного ритмичного отражения. Их перекрывают отложения Балтийского ледникового озера, которые согласно данным опробования представлены слоистыми глинами в нижней части и однородными ледниково-озерными глинами в верхней части (Ryabchuk et al., 2020 (в печати)). Данные отложения мощностью до 4 - 5,5 м окаймляют моренные гряды и ложбины, для которых характерна подводная эрозия и отсутствие седиментации. В левой части разреза между отложениями BIL и LG выделяется также слой однородных отложений (BP), который отличается акустической прозрачностью и ограниченным распространением - не более чем на 500-900 м. Далее вверх по разрезу следуют отложения Анцилового озера (ANC), граница между которыми неровная и контрастная из-за происшедшей эрозии осадочного материала. Эти отложения приурочены к окраинам бассейнов седиментации. Самая верхняя часть разреза сложена отложениями Литоринового моря, которые сформированы в пределах бассейнов седиментации. На данных сейсмоакустического профилирования была построена карта четвертичных отложений исследуемого участка (рис. 5).

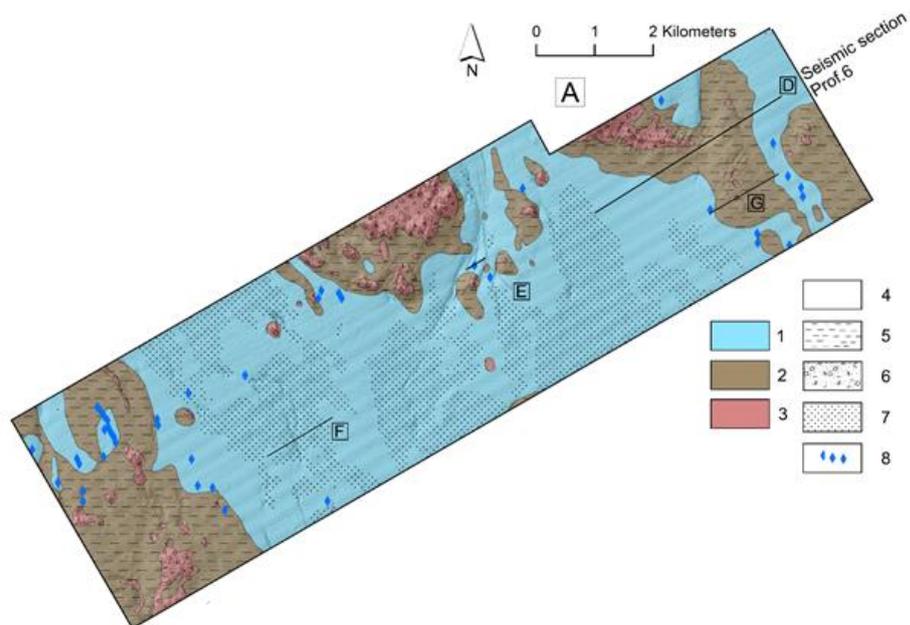


Рисунок 5. Карта четвертичных отложений участка "Гогланд" (составлена А.Ю.Сергеевым, И.А.Неевиным, ФГБУ «ВСЕГЕИ», Ryabchuk et al., 2020 (в печати))

Обозначения на карте: 1 - илы Литоринового моря (LIT) и Постлиторинового моря (pLIT), 2 - ледниково-озерные отложения Балтийского ледникового озера (BIL), 3 - ледниковые отложения (морена), 4 - илы, 5 - глины, 6 - морена, 7 - газонасыщенные отложения, 8 - погребенные ложбины

1.3 Геоморфология

Балтийское море занимает низинную территорию западной части Восточно-Европейской равнины. Причем северная его часть приурочена к склону Балтийского щита, а центральная и южная – к Балтийской синеклизе (рис.6).

Рельеф дна Финского залива преимущественно равнинный с локально встречающимися формами эрозионного, денудационного и ледникового происхождения. Такой рельеф обусловлен процессом пенепленизации, являвшимся определяющим рельефообразующим фактором на данной территории в течение продолжительного геологического времени (Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря, 2010).

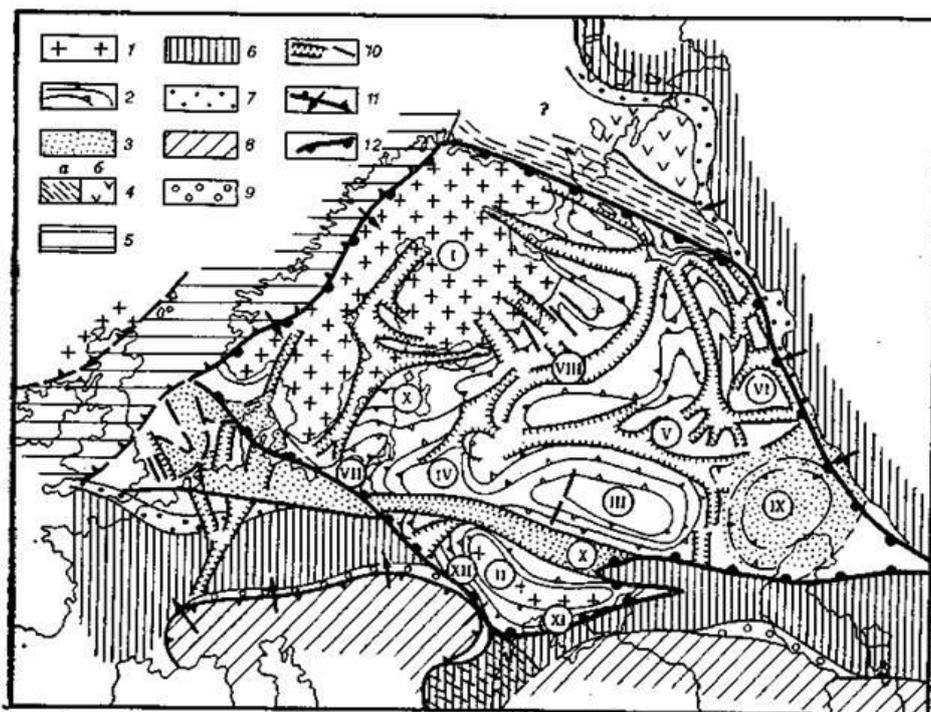


Рисунок 6. Тектоническая схема Восточно-Европейской платформы (Богданов, 1968)

1 — выступы на поверхность дорифейского фундамента (I — Балтийский и II — Украинский щиты); 2 — изогипсы поверхности фундамента (км), обрисовывающие главные структурные элементы Русской плиты (III — Воронежская и IV — Белорусская антеклизы; V — Татарский и VI — Токмовский своды Волго-Уральской антеклизы; VII — Балтийская, VIII — Московская и IX — Прикаспийская синеклизы; X — Днепровско-Донецкий прогиб; XI — Причерноморская впадина; XII — Днестровский прогиб); 3 — области развития соляной тектоники; 4 — эпибайкальская Тимано-Печорская плита, внешняя (а) и внутренняя (б) зоны; 5 — каледониды; 6 — герциниды; 7 — герцинские краевые прогибы; 8 — альпиды; 9 — альпийские краевые прогибы; 10 — авлакогены; II — надвиги, покровы и направление надвигания масс пород; 12 — современные границы платформы

Доледниковый субстрат представляет собой полого-волнистую равнину, расчлененную глубокими погребенными палеоврезами (древними погребенными долинами) и ложбинами ледникового выпаживания. Глубины врезов в таких долинах могут достигать порядка 100 м, а уклоны — 30-40°. Общая амплитуда рельефа залива не превышает обычно десятков метров. Для неоплейстоцена были характерны процессы общего выравнивания рельефа, связанные как с экзарационной, так и аккумулятивной ледниковой деятельностью. Современный облик рельефу придали такие процессы, как абразия, эрозия и аккумуляция.

Таким образом, при геоморфологической дифференциации рельефа Финского залива мы можем выделить три возрастные группы: дочетвертичную, неоплейстоценовую и голоценовую.

Рельеф поверхности дна исследуемого участка весьма неоднороден и сильно расчленен (рис. 7). Глубина изменяется от 22 м на вершинах подводных поднятий до 83 м

во впадинах. Большая часть участка расположена в пределах седиментационного бассейна и представляет собой равнину. В восточной части полигона находится приподнятое моренное плато ССВ-ЮЮЗ простирания. Высота самой высокой гряды здесь составляет ок. 10 м, а протяженность 1300 м. Склоны достаточно пологие ($2-5^\circ$) (Ryabchuk, et al., 2018). На поверхности гряды отмечаются округлые углубления диаметром до 100 м и глубиной до 5 м. В северной части полигона находится еще одно подобное поднятие, представляющее собой комплекс небольших гряд В-3 простирания. Их высота составляет 15-20 м, а протяженность каждой – 300-350 м. С востока это поднятие оконтуривается глубокой впадиной, простирающейся в направлении ССВ-ЮЮЗ. К востоку от впадины на поверхности дна обнажаются моренные отложения, представленные в рельефе подводным поднятием высотой 25 м. С востока его так же окаймляет подводная впадина. Таким образом, моренные гряды, простирающиеся в перпендикулярных направлениях, могут быть интерпретированы как расположенные по ходу движения ледника и параллельные краю ледника соответственно (Ryabchuk et al., 2020 (в печати)). Северные склоны у моренных гряд, вытянутых по ходу отступления ледника, являются более крутыми, чем пологие южные, что характерно для друмлиноподобных форм рельефа. Друмлины, образующиеся под телом ледника, характерны для территорий отступления Скандинавского ледника (Breilin et al., 2004). Формы рельефа, параллельные краю ледника, интерпретируются как части крупной отступающей морены и пересекающие её более мелкие гряды - морена де Геера, которая маркирует контакт ледника с поверхностью ледниково-подпрудного озера.

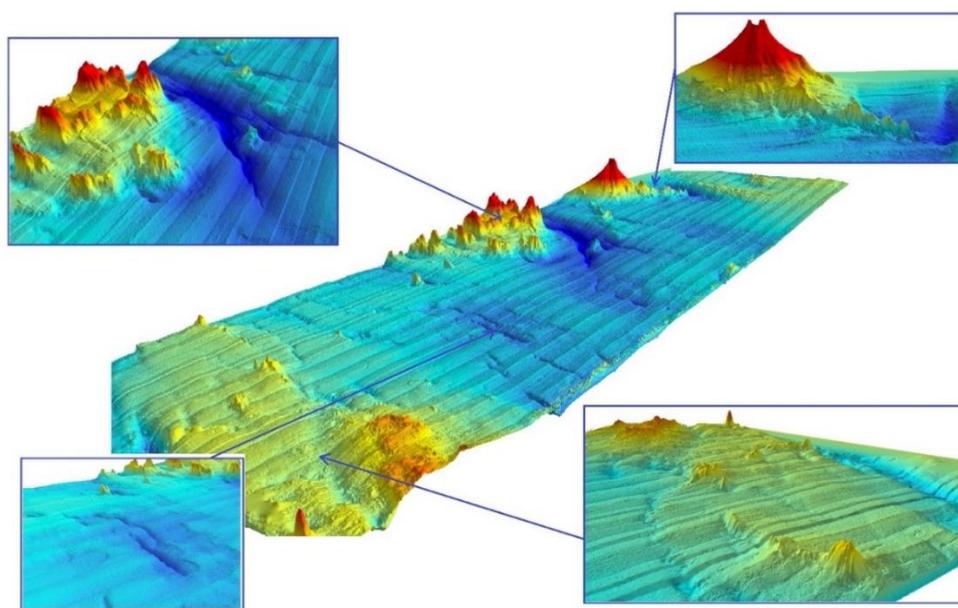


Рисунок 7. Рельеф дна участка в районе о. Гогланд по данным многолучевого эхолотирования (материалы 35 рейса ИО РАН на НИС «Академик Николай Страхов»)

Крайняя западная часть полигона характеризуется небольшими глубинами. Вся центральная часть полигона усеяна бороздами двух типов: серповидными, опоясывающими подводные поднятия, и прямолинейными субмеридионально вытянутыми. Их относительная глубина составляет 3 и 5 м, а длина - 4000 м и 1500 м соответственно. Серповидные борозды образованы придонными течениями, окаймляющими положительные формы рельефа. Формирование прямолинейных форм рельефа вероятнее всего связано с процессами, происходящими в газонасыщенных илах, к которым они приурочены.

1.4 Поверхностные отложения

Поверхностные отложения полигона представлены различными генетическими типами (рис. 8). Вершины подводных поднятий покрыты валунами, галькой с примесью гравия, частично перекрываются плейстоценовыми глинами. На некоторых участках моренных гряд заметен слой крупных корок железомарганцевых конкреций. Бассейны седиментации заполнены алевропелитами, в периферийных участках с примесью песка. Поверхность газонасыщенных илов преимущественно представлены бескислородными илами. Глубоководная впадина на севере полигона, по которой проходит контуритовое течение, сложена илами, содержащими песчаные частицы и редкие сферические железомарганцевые конкреции.

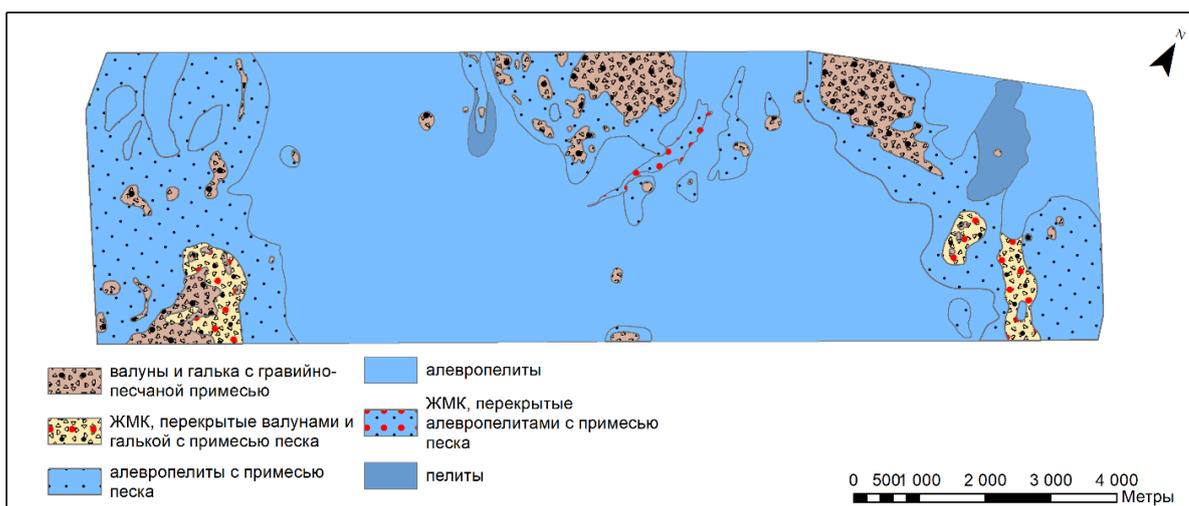


Рисунок 8. Литологическая карта участка "Гогланд"

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Методика создания карты подводных ландшафтов для участка «Гогланд»

Данные, анализ которых представлен в работе, были получены в ходе экспедиций ВСЕГЕИ на НИС «Соболец» и «СН2» (2016-2018 гг.) (непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП), геологический пробоотбор), ИО РАН и ВСЕГЕИ на научно-исследовательском судне «Академик Николай Страхов» (19-25 июля 2017 г.) (многолучевое эхолотирование, НСП) и ИО РАН на НИС «Академик Борис Петров» (июль-август 2018 г.) (биологический пробоотбор). Для изучения площади дна полигона использовались многолучевой эхолот (Teledyne RESON Seabat 8111-E208-3F66 Dry MBES system) и профилограф (EdgeTech 3300-НМ с Discover Sub-Bottom v3.36). Многолучевое эхолотирование позволило создать трехмерные изображения рельефа дна высокого разрешения, профилометр предназначался для картирования геологического строения верхней части (50-100 м) осадочного чехла. Геологические пробы (отобраны при помощи бокс-кореров и гравитационной ударной прямоточной трубы), а также подводные видеонаблюдения были выполнены в 2018 г. в ходе осуществления одного из проектов ВСЕГЕИ. Биологические пробы были отобраны ковшами Ван-Вина в ходе экспедиции НИС «Академик Борис Петров» в период июля-августа 2018. Тогда же выполнялись гидрологические измерения.

Таким образом для картирования донных ландшафтов были отобраны следующие типы данных:

1. Географические координаты;
2. Глубина;
3. Солёность вод;
4. Содержание кислорода на границе вода-дно;
5. Характер поверхностных донных осадков;
6. Макрозообентос.

На подготовительном этапе разработки карты для исследуемого участка была создана таблица Excel, в которой на основе семи характеристик вся территория была поделена на смежные полигоны – различные типы ландшафтов. В качестве характеристик были выбраны такие параметры, как солёность и волновое воздействие (одинаковые в пределах одного участка), глубина, степень влияния волн и течений, тип подстилающих пород, характеристика подстилающих пород и сообщества живых организмов. Таким образом, для участка около о. Гогланд было выделено 8 типов ландшафтов (Приложение 1).

Непосредственно ландшафтная карта создавалась при помощи программного обеспечения ArcGIS 10.5. Разработка проходила в несколько этапов. Первым шагом стало добавление в рабочее пространство программы в качестве тематических слоёв трёх ранее созданных карт, на основе которых должна составляться карта ландшафтов. Такими картами-основами были батиметрическая, литологическая и карта четвертичных отложений. На втором шаге работа велась по трем направлениям, т.е. с каждым из ранее упомянутых тематических слоев. На карте глубин выделялись изобаты, формирующие группы по глубине, указанные в таблицах. Далее создавался новый слой карты с некоторым количеством полигонов, образовавшихся разбиением цельного участка выделенными изолиниями. Литологическая карта использовалась без изменений, так как уже представляла собой смежные полигоны, характеризующиеся различными генетическими типами поверхностных донных осадков. Каждому такому полигону для удобства дальнейшего использования присваивался идентификационный номер от 1 до 3, отражающий тип отложений. Карта четвертичных отложений использовалась так же в своем первоначальном виде, а полигоны, представленные на ней, получили идентификационные номера от 1 до 3 в зависимости от типа четвертичных отложений.

Следующим этапом стало создание единого слоя, отражающего характеристики всех трех карт. Для этого использовался программный инструмент «Объединение», позволивший получить новую карту, состоящую из полигонов, образованных пересечением полигонов всех трех карт. Некоторые полигоны были нанесены вручную с опорой на теоретические выводы. Это связано с тем, что большое количество проб и измерений, в частности отсутствия или наличия кислородной обстановки, позволили создать более точную карту.

На завершающей стадии разработки ландшафтных карт действия велись с атрибутивными таблицами. Здесь каждому полигону присваивалось уникальное имя, состоящее из трех цифр, обозначающих различные его характеристики: глубину, тип поверхностных отложений и тип четвертичных отложений. В итоге все полигоны были классифицированы в группы, которые удалось отразить на карте с помощью различной цветовой окраски.

2.2 Методика отбора проб донных осадков

Отбор проб и образцов грунтов производился летом 2019 г. с помощью бокс-корера (рис. 11), ковша-дночерпателя грейферного типа, «тяжелой» гравитационной прямоточной грунтовой трубки, грунтовой трубки (ГТТ) конструкции Лаури-Ниёмисто (рис. 9) и

небольшой драги «Морская крыса». Выбор средства пробоотбора осуществлялся в зависимости от глубины моря, характера донных осадков и целесообразности.

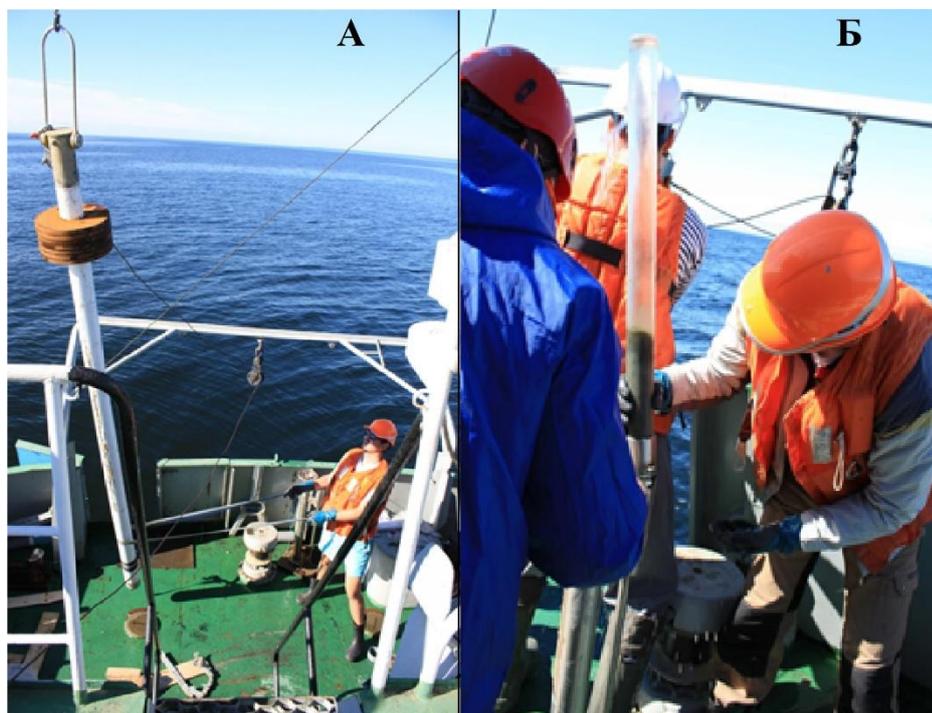


Рисунок 9. Отбор проб газонасыщенных грунтов: А – «тяжелая» прямоточная гравитационная трубка – отбор керна на определение физико-механических свойств; Б - трубка ГГТ (отбор придонных вод) и ненарушенных поверхностных грунтов

Первым этапом была произведена геологическая обработка проб на борту судна, которая заключалась в описании отобранной пробы донных осадков и фотодокументации образцов. Текстовое описание включало наименование грунта в соответствии с классификацией, цвет осадка, текстура, наличие и количество минеральных и органических включений, характеристика контактов и т.д. Составлялась ведомость отбора проб донных осадков.

Отбор, упаковка, хранение и транспортировка проб для определения физических и физико-механических свойств осуществлялась в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов). Отбор проб грунтов на определение газового состава производится в стеклянные бутылки объемом 250 мл с герметизацией резиновой пробкой, обжатой алюминиевым колпаком. Отбор проб грунтов на определение гранулометрического состава и геохимические исследования при изучении газово-флюидных проявлений производился в пластиковые мешки (грипперы).

Всего для последующего анализа на содержание тяжелых металлов было отобрано 23 пробы (рис. 10).

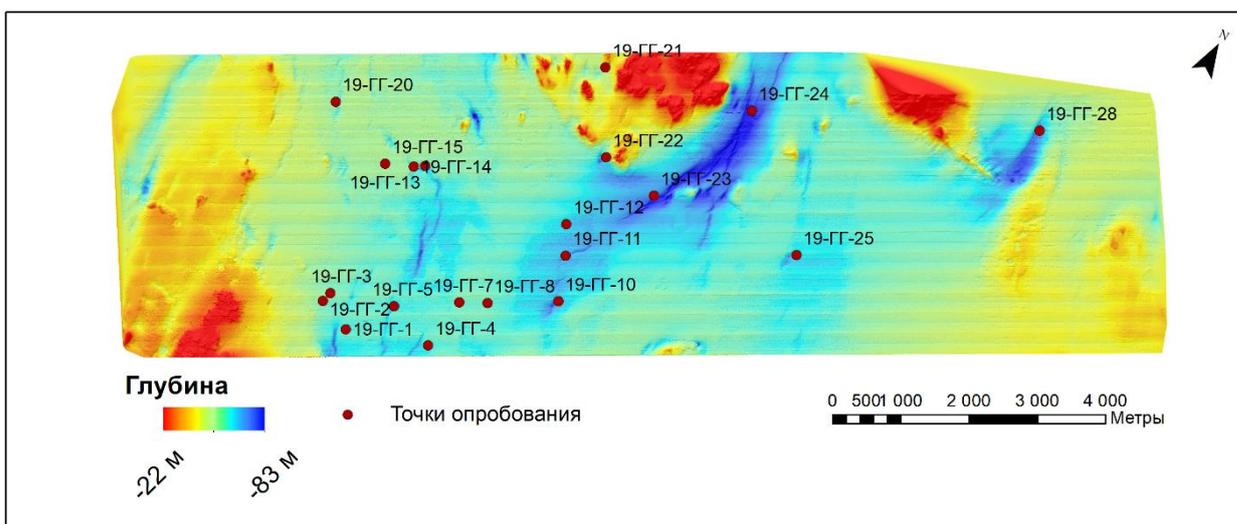


Рисунок 10. Карта фактического материала



Рисунок 11. Проба, отобранная бокс-корером

Следующим этапом стала пробоподготовка. Отобранные пробы донных осадков в количестве 23 штук были помещены в сушильный шкаф на 7 суток до достижения ими воздушного сухого состояния. По истечении вышеуказанного срока, пробы подвергались измельчению при помощи мельниц VLM-20 (рис. 12). Все пробы были измельчены до порошкообразного состояния (рис. 13).



Рисунок 12. Лабораторная мельница VLM-20

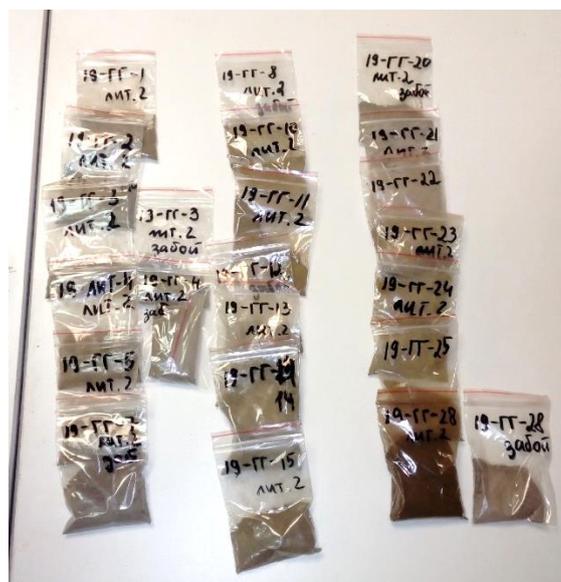


Рисунок 13. Порошкообразные пробы донных осадков

2.3 Методика проведения рентгенофлуоресцентного анализа

Рентгенофлуоресцентный анализ – один из методов рентгеноспектрального анализа, основанных на взаимодействии рентгеновского излучения с анализируемым веществом (Соболев, 2014). Данный анализ позволяет получить данные об элементарном составе образцов за относительно небольшой промежуток времени. Преимуществом метода является возможность получения данных о составе сложного материала без его разрушения, с сохранением его физико-химических свойств, что особенно важно при работе с дорогостоящими и новыми экспериментальными образцами.

Метод рентгенофлуоресцентного анализа основан на зависимости интенсивности рентгеновской флуоресценции от концентрации элемента в образце. При облучении образца мощным потоком излучения рентгеновской трубки возникает характеристическое флуоресцентное излучение атомов, которое пропорционально их концентрации в образце. Для проведения рентгенофлуоресцентного анализа 23 проб донных осадков (рис. 14), отобранных на исследуемом участке, использовался рентгеновский анализатор AP-104 (рис. 15). Анализ проходил в лаборатории кафедры экологической геологии СПбГУ. Измеряемые элементы в пробах - Fe, Ni, Mn, Pb, Zn, Cu, As. В качестве контрольных образцов использовались: SiO₂ (кварц) и образец Z с эквивалентным содержанием элементов Zn 3000 г/т, Cu 9900 г/т, Pb 4500 г/т. Нижний предел обнаружения прибора - 10 г/т, верхний предел на изучаемых пробах не наблюдался.

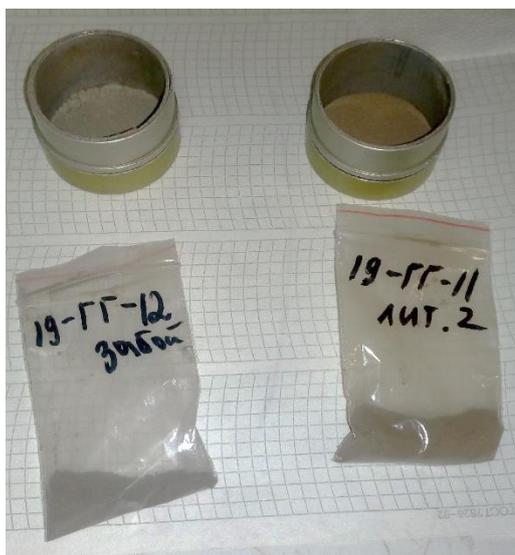


Рисунок 14. Порошковые пробы донных осадков в кюветах



Рисунок 15. AP-104

Рентгеновский анализатор (спектрометр) состоит из блока управления, регистрирующего устройства, детектора и флуоресцирующей рентгеновской трубки. На рис. 16 схематично изображена рентгенооптическая схема спектрометра, поясняющая его работу. Первичное излучение рентгеновской трубки (2) возбуждает в исследуемом образце (1) флуоресцентное излучение, которое через входную щель (3) попадает на фокусирующий кристалл-анализатор (4), выделяющий из спектра образца характеристическую линию, соответствующую условиям отражения по закону Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\Theta,$$

где n – порядок отражения ($n = 1, 2, \dots$); λ – длина волны падающего излучения; d – межплоскостное расстояние кристалл-анализатора; Θ – угол падения излучения на кристалл.

Выделенное излучение кристалл-анализатор фокусирует в приемную щель (5) блока детектирования (6), сигнал с которого поступает на вход усилителя-дискриминатора, затем на вход счетного устройства (Ширкин, 2009).

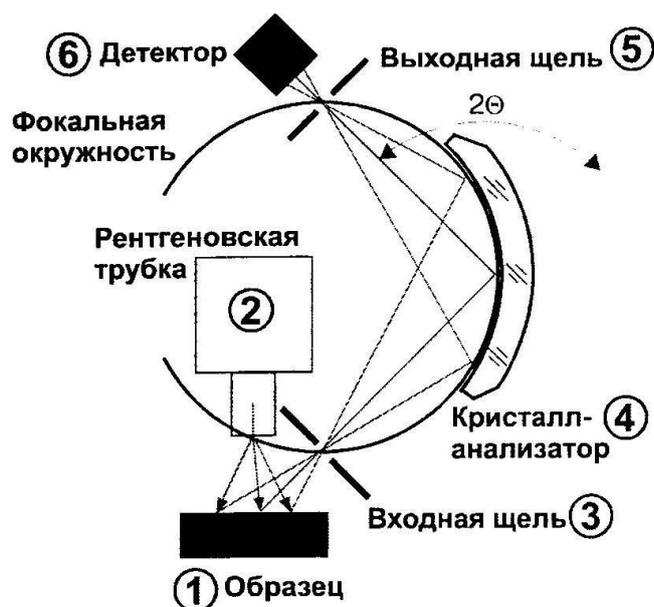


Рисунок 16. Рентгенооптическая схема (Ширкин, 2009): 1 – исследуемый образец; 2 – рентгеновая трубка; 3 – входная щель; 4 – кристалл-анализатор; 5 – приемная (выходная) щель; 6 – блок детектирования

Полученные данные поступают в персональный компьютер для обработки и вычисления содержания химических элементов.

2.4 Нормирование содержания загрязняющих веществ в донных осадках

Роль донных осадков в функционировании морских экосистем весьма важна: они являются депонирующей средой для загрязняющих веществ, в частности тяжелых металлов, которые поступают из атмосферы, с хозяйственными и промышленными водами. И именно донные осадки служат источником вторичного загрязнения водоёмов. Для контроля уровня загрязнения необходимо опираться на нормативы содержания различных загрязняющих веществ в донных осадках. В настоящее время в РФ существуют нормативы лишь для почв (ПДК, ОДК), для донных осадков они отсутствуют. Так как использовать для донных осадков ПДК почв не корректно, в данной исследовательской работе будут рассмотрены нормативы, полученные опытным путем в других странах.

Существует несколько подходов к оценке критериев качества химического состава донных осадков.

Первый - геохимический подход, основанный на использовании в качестве нормативов фоновых концентраций и показателей содержания элементов, полученных на эталонных участках. Данные стандарты могут быть применены лишь на ограниченной территории, так как их использование базируется на учете геохимических и геологических

особенностей этой территории. К данному типу относится классификация оценки качества донных отложений Норвежского агентства по контролю за загрязнением окружающей среды (табл.1). Представленная классификация была составлена по результатам пробоотбора в водах, не загрязненных конкретными промышленными сбросами (WGMS, 2003).

Элемент/ мг/кг	Класс I (фоновое)	Класс II (умеренное)	Класс III (явное)	Класс IV (сильное)	Класс V (экстремальное)
Мышьяк (As)	<20	20-80	80-400	400-1000	>1000
Кадмий (Cd)	<0,25	0,25-1	1-5	5-10	>10
Хром (Cr)	<70	70-300	300-1500	1500-5000	>5000
Медь (Cu)	<35	35-150	150-700	700-1500	>1500
Ртуть (Hg)	<0,15	0,15-0,6	0,6-3	3-5	>5
Никель (Ni)	<30	30-130	130-600	600-1500	>1500
Свинец (Pb)	<30	30-120	120-600	600-1500	>1500
Цинк (Zn)	<150	150-700	700-3000	3000-10000	>10000

Таблица 1. Классификация оценки качества донных отложений Норвежского агентства по контролю за загрязнением окружающей среды (WGMS, 2003)

Другой применяемый подход - биотический, основанный на выявлении предельных уровней реакций живых организмов (биоиндикационные исследования). Устанавливаемый пороговый уровень — это такая концентрация загрязняющего вещества, выше которой может быть причинен вред наиболее чувствительным биологическим видам. В данном случае реализуется «принцип слабого звена».

Примерами нормативов могут служить следующие критерии: уровень содержания загрязняющих веществ в донных осадках, не вызывающий негативного эффекта на бентосные организмы (TEL— threshold effect level (Smith et al., 1996), ER-L – effect range-low (Long, Morgan, 1991)) и уровень загрязнения, выше которого наблюдается угнетение бентосных организмов (PEL— probable effect level (Smith et al., 1996)). В американской системе ER-L пороговое значение соответствует 10 перцентилем концентрации вещества, вызывающей негативный эффект. В Канаде для разработки нормативов, принятых в 1995 г. использовали подход разбавления осадка веществом (spiked sediments) для определения токсичности. «Пороговый уровень» (TEL) был рассчитан как квадратный корень из произведения 15 перцентилей концентрации вещества, влияющей на биоту, и 50 перцентилей концентрации вещества, не влияющей на биоту. В пределах этого уровня

концентрации поллютантов в донных осадках не представляют серьезной опасности для морских организмов. Усовершенствованные стандарты, принятые Канадским Советом Министерства окружающей среды, включают в себя два параметра – нижний «interim sediment quality guideline» (ISQG), соответствующее уровню TEL по классификации 1995 г. и верхний «probableeffect level» (PEL), выше которого опасное воздействие на биоту считается весьма вероятным (табл. 2).

Элемент	Американская NOAA (ER-L)	Канадская (TEL)	Канадская (PEL)
As	35	7,24	41,6
Cd	5	0,7	3,53
Cr	80	52,3	160
Cu	70	18,7	108
Hg	0,15	0,13	0,486
Ni	30	18	36
Pb	35	30,2	100
Zn	120	124	271

Таблица 2. Сравнение нормативов ER-L, TEL и PEL для донных осадков (Smith et al., 1996; Long, Morgan, 1991)

При разработке нормативов для донных осадков часто используется интегральный метод, основанный на интеграции данных физико-химического, токсикологического и биологического мониторинга донных осадков. Процедура расчета критериев оценки качества донных осадков состоит из нескольких последовательных этапов (Deckere et al., 2011). На первом этапе происходит анализ биоиндикационных данных: для каждого таксона по всем нормируемым загрязняющим веществам рассчитывают значения 5-го и 95-го перцентилей. Использование 95-го перцентиля в большей степени соответствует концепции экологического риска, согласно которой гарантируется безопасность для 95% видов, обитающих в экосистеме (Степанова, 2014). В результате обработки данных по встречаемости бентосных таксонов получают интервал значений для каждого загрязняющего вещества: нижний уровень LEL (Lowest Effect Levels), при котором можно гарантировать присутствие максимального количества бентосных видов. Соответственно верхний уровень интервала содержания загрязняющих веществ SEL (Severe Effect Levels) характеризует уровень, при котором выживают $\leq 5\%$ или менее таксонов в природных условиях (табл. 3).

Элемент / мг/кг	LEL	SEL
Мышьяк (As)	6	33
Кадмий (Cd)	0,6	10
Хром (Cr)	26	110
Медь (Cu)	16	110
Свинец (Pb)	31	250
Ртуть (Hg)	0,2	2
Никель (Ni)	16	75
Цинк (Zn)	120	820

Таблица 3. Сравнение нормативов LEL и SEL для донных осадков (MacDonald et al., 2000)

Все вышеупомянутые методы и нормативы (рис. 17 и 18) имеют как преимущества, так и недостатки. Однако применять какой-либо из данных методов для полноценной оценки загрязнений донных осадков восточной части Финского залива, а в частности и для исследуемого участка, некорректно в силу геохимических и геологических особенностей данной территории, не учтенных при создании нормативов.

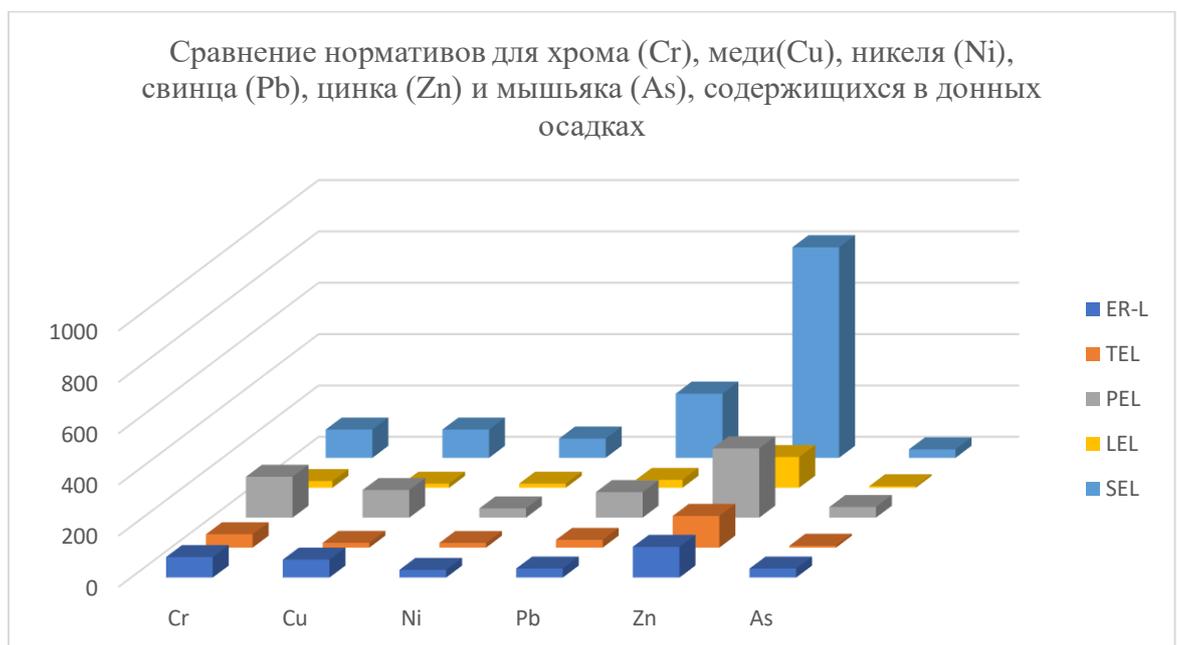


Рисунок 17. Сравнение нормативов загрязняющих веществ для донных осадков (а)

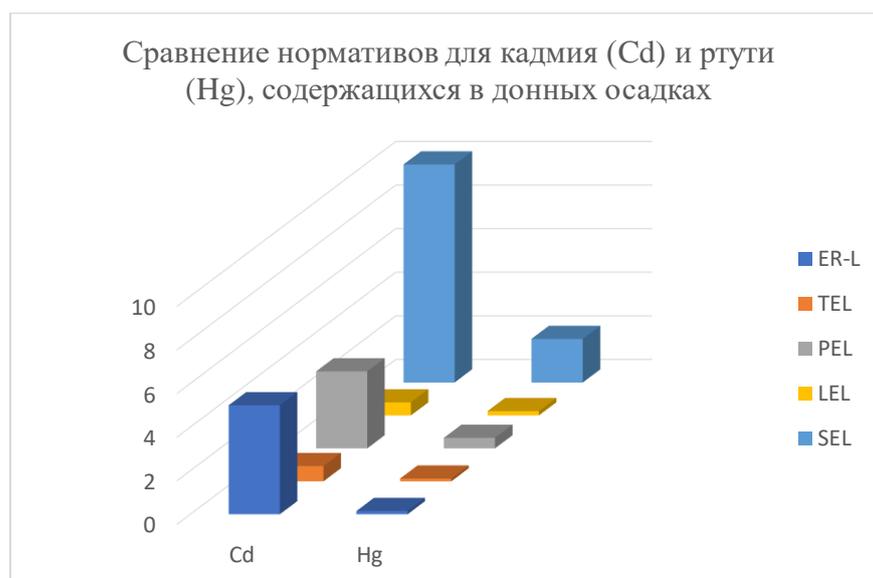


Рисунок 18. Сравнение нормативов загрязняющих веществ для донных осадков (б)

На практике часто используют еще один более универсальный метод - нахождение коэффициента концентрации (K_K), равного отношению концентрации данного элемента в пробе (C_i) к его фоновой концентрации в среде ($C_{i\phi}$):

$$K_K = \frac{C_i}{C_{i\phi}}$$

В качестве фонового значения концентраций могут быть использованы кларки горных пород, региональные фоны, доиндустриальные концентрации. Основной проблемой данного метода является отсутствие таблиц или градаций значений коэффициентов концентрации, характеризующих степень загрязнения донных осадков.

Для интегральной оценки загрязнения используется суммарный индекс загрязнения донных осадков:

$$Z_c = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i\phi}} \right) - (n - 1)$$

где n – количество веществ, содержание которых превышает фоновые значения.

Для Санкт-Петербурга был создан региональный норматив, содержащий критерии оценки загрязнения донных осадков (Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, 1996). Норматив был разработан ОАО "Ленморниипроект" по заказу Управления по охране окружающей среды мэрии Санкт-Петербурга. При разработке данных норм и критериев загрязнённости донных осадков за основу приняты нормы и критерии Голландии, предложенные Агентством по охране окружающей среды Голландии (DCMR), Центром исследования почв и грунтов (TNO) и фирмой "HASKONING".

В табл. 4 представлены четыре уровня загрязнения донных осадков тяжелыми металлами. Им соответствуют пять классов загрязненности:

- Класс 0 - чистые отложения, концентрация загрязняющих веществ в которых не превышает целевой уровень;
- Класс I - слабозагрязненные отложения, концентрации загрязняющих веществ в которых находятся между целевым и предельным уровнями;
- Класс II - умеренно загрязненные отложения, концентрации загрязняющих веществ в которых находятся между предельным и проверочным уровнями;
- Класс III - сильно загрязненные отложения, концентрации загрязняющих веществ в которых находятся между проверочным уровнем и уровнем, требующим вмешательства;
- Класс IV - опасно загрязненные отложения, концентрация загрязняющих веществ в которых превышает уровень, требующий вмешательства.

Загрязняющее вещество	Целевой уровень	Предельный уровень	Проверочный уровень	Уровень вмешательства
Кадмий	0,8	2	7,5	12
Ртуть	0,3	0,5	1,6	10
Медь	35	35	90	190
Никель	35	35	45	210
Свинец	85	530	530	530
Цинк	140	480	720	720
Хром	100	380	380	380
Мышьяк	29	55	55	55

Таблица 4. Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга (Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, 1996).

Данный документ распространяется на нормы и критерии загрязненности донных осадков, извлекаемых из водных объектов при проведении дноуглубительных работ и решении вопросов их дальнейшего использования.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Донные ландшафты исследуемого участка

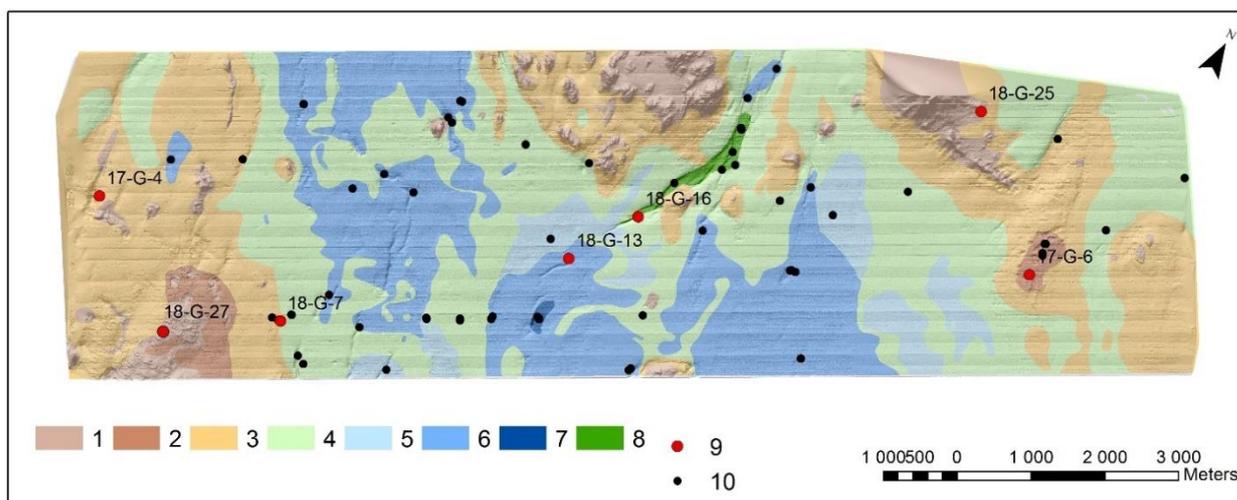


Рисунок 19. Карта донных ландшафтов участка "Гогланд"

Цифрами на карте обозначены: 1 - Среднеэнергетическая циркулиторияль в зонах развития миктитов с железомарганцевыми конкрециями; 2 - Среднеэнергетическая циркулиторияль в зонах развития миктитов с крупными корками железомарганцевых конкреций; 3 - Среднеэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов с примесью песка и железомарганцевыми конкрециями, залегающая на поверхности размыта плотных глин, аэробные условия; 4 - Среднеэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов с примесью песка; аэробные условия; 5 - Низкоэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов; аэробные условия; 6 - Низкоэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов; преимущественно анаэробные условия; 7 - Низкоэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов; анаэробные условия; 8 - Высокоэнергетическая циркулиторияль в зонах развития алевропелитовых илов; аэробные условия на дне подводных ложбин контуритовых течений; 9 – точки биологического опробования; 10 – точки геологического опробования.

В границах исследуемого участка было выделено восемь типов ландшафтов (рис. 19). Тип №1 распространен в пределах вершин подводных поднятий и гряд и отличается наличием смешанных осадочных пород от валунов и гальки до песчано-гравийной смеси. Тип №2 представлен в крайней западной и восточной частях полигона. В первом случае данный ландшафт окаймляет с восточной стороны невысокую гряду; во втором случае - принадлежит к самой гряде, на поверхности которой отмечаются углубления глубиной до 5 м. Отличительное свойство типа ландшафтов №2 - наличие крупных корок железомарганцевых конкреций. Тип №3 представлен на выровненных участках дна и характеризуется достаточно высокой численностью живых организмов. Наибольшую площадь распространения (34% от общей площади полигона) имеет тип ландшафта №4. Данный ландшафт, являющийся наиболее пригодным для макрозообентоса,

характеризуется олигохалинными водами и алевропелитовой поверхностью дна, залегающей на основании, представленном голоценовыми алевроглинами. В центральной части участка расположены ландшафты, для которых характерны высокое содержание метана в илах (тип ландшафта №5), а также существование условий приближенных к анаэробным и, как следствие, низкая численность макрозообентоса (тип ландшафта №6). Важной особенностью рассматриваемого полигона является наличие безжизненных бескислородных илов, определяющих распространение типа ландшафтов №7. Тип №8 представлен локально и занимает лишь небольшую площадь в центральной части участка. Его выделение обусловлено влиянием на экосистемы контуритового течения.

Созданная ландшафтная карта, а также данные биологического опробования показали, что наиболее пригодным для живых организмов (бентоса) является тип ландшафта №4 - среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов с примесью песка, а наименее пригодным – тип №7 - низкоэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов, анаэробные условия. Таким образом, можно сделать вывод о том, что абиотическими факторами, определяющими видовой состав, численность и биомассу макрозообентоса, являются тип поверхностных отложений, тип подстилающих четвертичных отложений и окислительно-восстановительные условия в придонном слое, т.е. наличие кислородной или бескислородной обстановки.

3.2 Результаты определения валовых форм тяжелых металлов в донных осадках и их математико-статистическая обработка

В результате обработки данных, полученных в ходе рентгенофлуоресцентного анализа, была получена таблица, содержащая значения содержаний 7 элементов (железо, марганец, медь, свинец, цинк, никель, мышьяк) в каждой из 23 проб донных осадков (Приложение 2).

Следующим этапом стала математико-статистическая обработка данных с использованием программы STATISTICA 10. Результатом обработки стало построение для каждого элемента диаграммы «ящик с усами», на которой наглядно представлены медианное, максимальное и минимальное значения, а также математически рассчитанные экстремальные и выделяющиеся значения элементов (рис. 20 и 21).

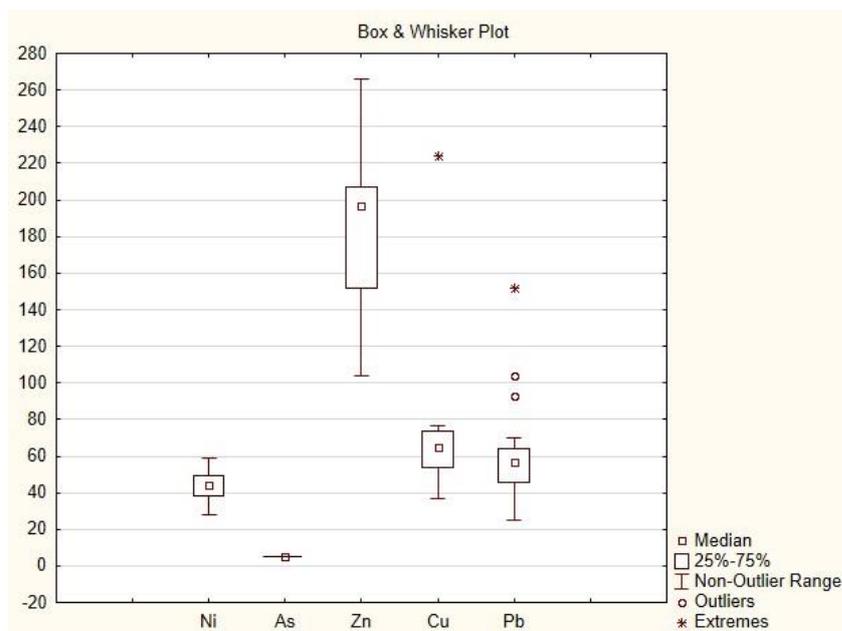


Рисунок 20. Диаграмма "ящик с усами" для никеля (Ni), мышьяка (As), цинка (Zn), меди (Cu) и свинца (Pb)

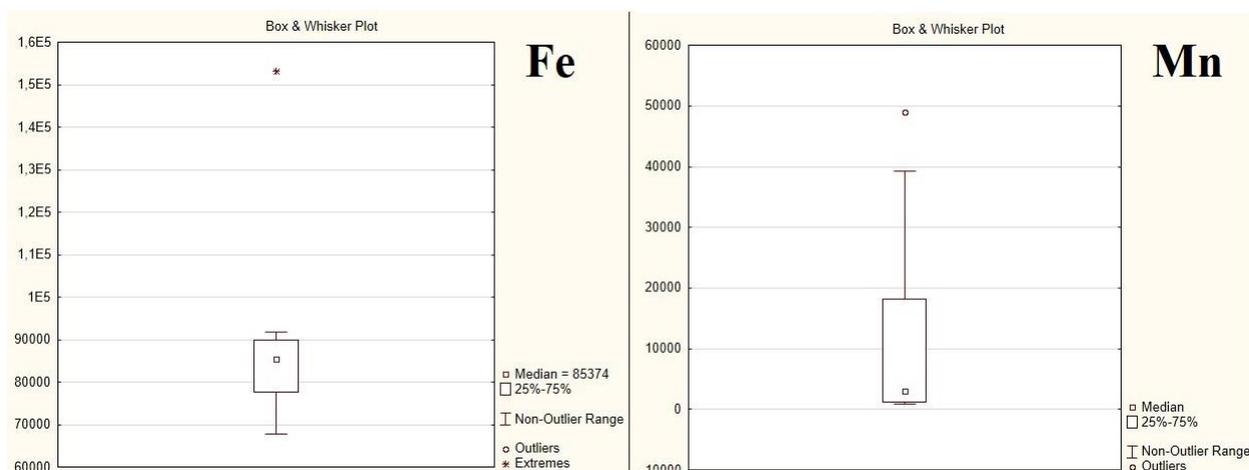


Рисунок 21. Диаграммы "ящик с усами" для железа (Fe) и марганца (Mn)

Как видно из представленных выше диаграмм, содержание мышьяка во всех пробах одинаково (5 г/т) и находится ниже предела чувствительности прибора. Данное содержание мышьяка в донных осадках согласно всем приведенным в главе 2.4 классификациям позволяет охарактеризовать последние как чистые отложения, поэтому далее распределение мышьяка в донных осадках рассматриваться не будет.

Распределение никеля в пробах симметрично и не имеет выделяющихся значений. Аналогично распределение и для цинка, однако его медиана смещена в областях высоких значений. На диаграмме для меди отмечается одна проба с экстремально высоким содержанием (224 г/т) меди в донных осадках - 19-ГГ-22, принадлежащая к типу ландшафта №4. Содержание свинца в пробах характеризуется одним экстремально высоким содержанием (152 г/т, проба 19-ГГ-7, тип №4) и двумя выделяющимися (104 г/т, 19-ГГ-8, тип №4 и 93 г/т, 19-ГГ-14, тип №4). Распределение марганца в пробах весьма

несимметрично, медиана сильно смещена в область низких значений. Выделяющееся значение содержания марганца (48 992 г/т) наблюдается в пробе 19-ГГ-28 (тип ландшафта №3). Для этой же пробы характерно экстремально высокое содержание железа - 153 168 г/т. Высокое содержание Fe и Mn в данной пробе объясняется наличием многочисленных дробовидных железомарганцевых конкреций, обнаруженных в пробе при её отборе.

Дополнительно были вычислены медианные значения в каждом из распределений металлов (табл. 5). Данные значения могут быть приняты в качестве фоновых значений концентрации элементов в донных осадках, так как медиана обладает свойством робастности, т.е. на неё не влияют выделяющиеся значения (выбросы).

Элемент	Количество проб	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Fe	23	85374	67771	153168	21420,1
Ni	23	44	28	59	7,7
Mn	23	3100	856	48992	15510,5
As	23	5	5	5	0,00
Zn	23	197	104	266	42,5
Cu	23	65	37	224	35,5
Pb	23	57	25	152	26,7

Таблица 5. Значения медиан распределений железа, никеля, марганца, мышьяка, цинка, меди и свинца

Для выявления общих закономерностей распределения элементов в донных осадках и обнаружения скрытых факторов в программе STATISTICA 10 был проведен факторный анализ методом главных компонент. Согласно критерию «каменной осыпи» (рис. 22) для объяснения основной изменчивости распределения изучаемых элементов в донных осадках достаточно рассмотреть два фактора.

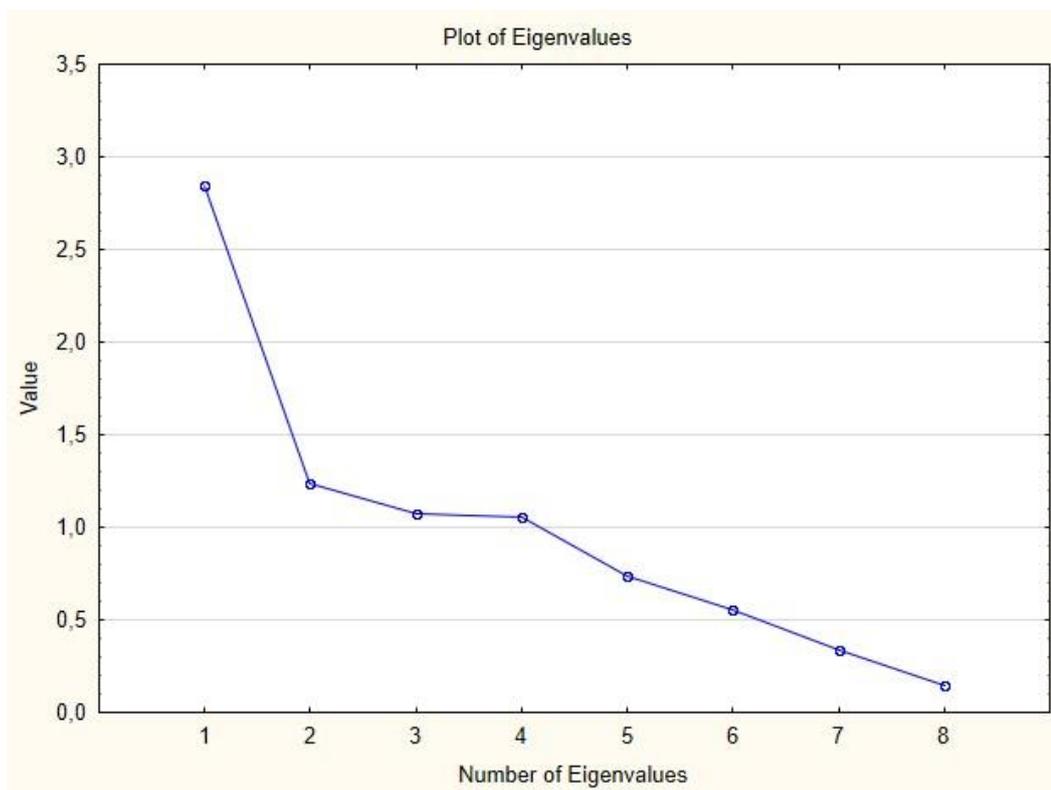


Рисунок 22. Критерий "каменной осыпи"

На первый фактор приходится 35% суммарной дисперсии, причем наибольшие коэффициенты имеют железо и марганец - 89% и 85% дисперсий соответственно. Этот фактор связан с образованием железомарганцевых конкреций, которые формируются в процессе химического и биохимического выветривания в условиях кислородной обстановки и полной тектонической пассивности и приурочены к склонам банок и впадин, а также поверхностям плосковидных подводных поднятий. На долю второго фактора приходится 16% общей дисперсии. Данному фактору соответствуют максимальные значения меди и цинка, аккумуляция которых приурочена к алевропелитовой фракции донных осадков. Второй фактор может быть интерпретирован как влияние гранулометрического состава.

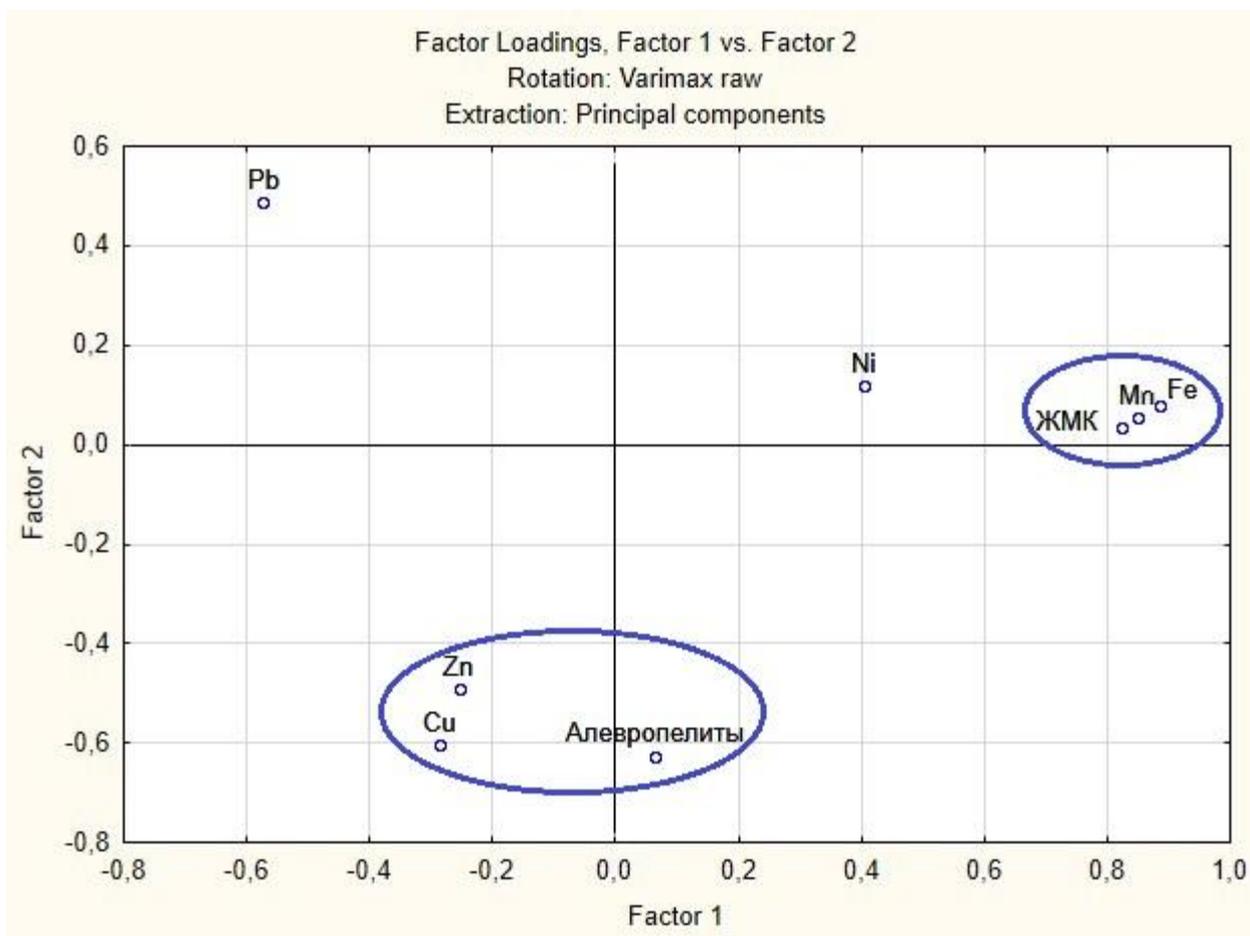


Рисунок 23. Диаграмма факторных нагрузок для донных осадков

3.2 Распределение тяжелых металлов в донных осадках подводных ландшафтов участка «Гогланд»

Как было упомянуто ранее, содержание мышьяка (I класс опасности) во всех пробах одинаково (5 г/т) и находится ниже предела чувствительности прибора. Данное содержание мышьяка в донных осадках согласно всем приведенным в главе 2.4 классификациям позволяет охарактеризовать последние как чистые отложения, поэтому составление карты распределения мышьяка в пределах исследуемого участка не рационально.

Для всех остальных элементов в программе ArcGIS 10.5 были созданы карты распределения элементов, которые отражают интерполированное содержание элемента в каждой точке исследуемого полигона, а также его коэффициент концентрации K_k . Построение карт было осуществлено при помощи модуля ArcGIS - Geostatistical analyst. Интерполяция осуществлялась методом обратных взвешенных расстояний, который является быстрым детерминированным интерполятором и хорошо подходит для первичной оценки интерполированной поверхности. Значения интервалов классификации были взяты

согласно нормативу, разработанному ОАО «Ленморниипроект» (Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, 1996) и в дальнейшем нормированы на фоновые значения.

Как видно из рис. 24 доминирующая площадь всех типов ландшафтов является слабо загрязненной цинком (III класс опасности), за исключением трех локально выраженных участков. Однако в данном случае содержание цинка в донных осадках незначительно превышает рассчитанное фоновое значение концентрации цинка. Коэффициент концентрации составляет 0,7 - 1,35.

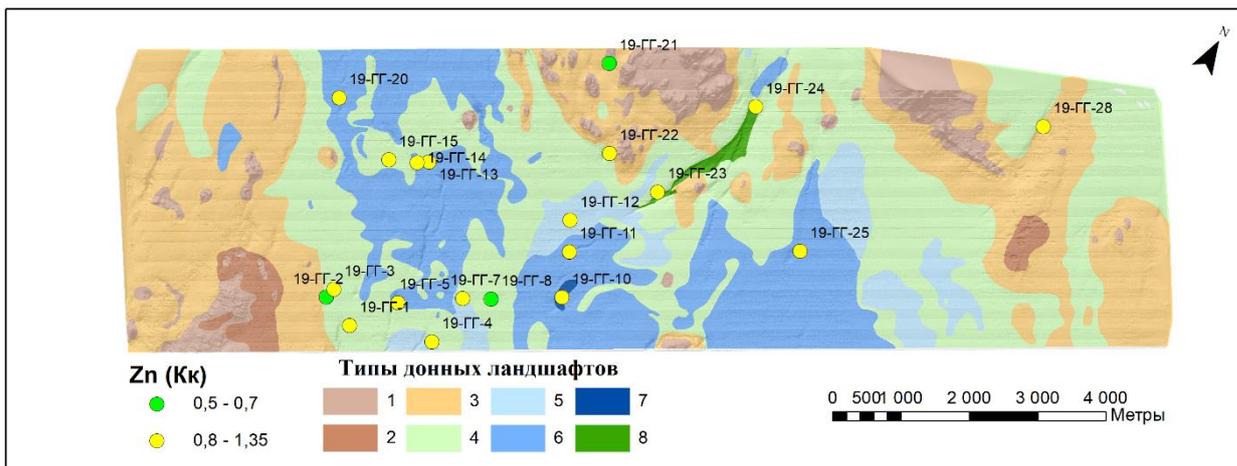


Рисунок 24. Карта распределения коэффициентов концентрации цинка в донных осадках

Относительно содержания меди (III класс опасности) в донных осадках большая часть ландшафтов является слабо и умеренно загрязненными (рис. 25). Локальное увеличение концентрации меди наблюдается в точке 19-ГГ-22, приуроченной к типу ландшафта №4. Данная область загрязнения характеризуется превышением фона в 3,9 раза.

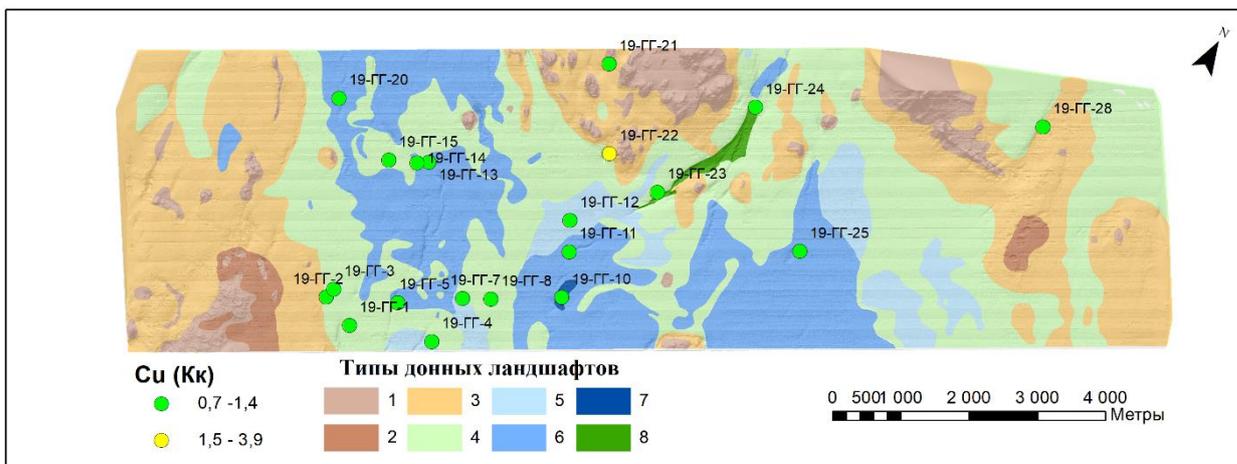


Рисунок 25. Карта распределения коэффициентов концентрации меди в донных осадках

Загрязнение никелем (II класс опасности) исследуемой территории весьма неравномерно (рис. 26). Выделяются три загрязненные области, для которых характерно повышенное содержание никеля, но не превышающее фоновое значение более чем в 1,3 раза. Таким образом увеличенное содержание никеля характерно в основном для типов ландшафтов №3 и №4 и может быть связано с формированием железомарганцевых конкреций, в элементарный состав которых входит железо, марганец, а также никель, медь и кобальт. «Чистой» считается проба 19-ГГ-5, приуроченная к типу ландшафта №6.

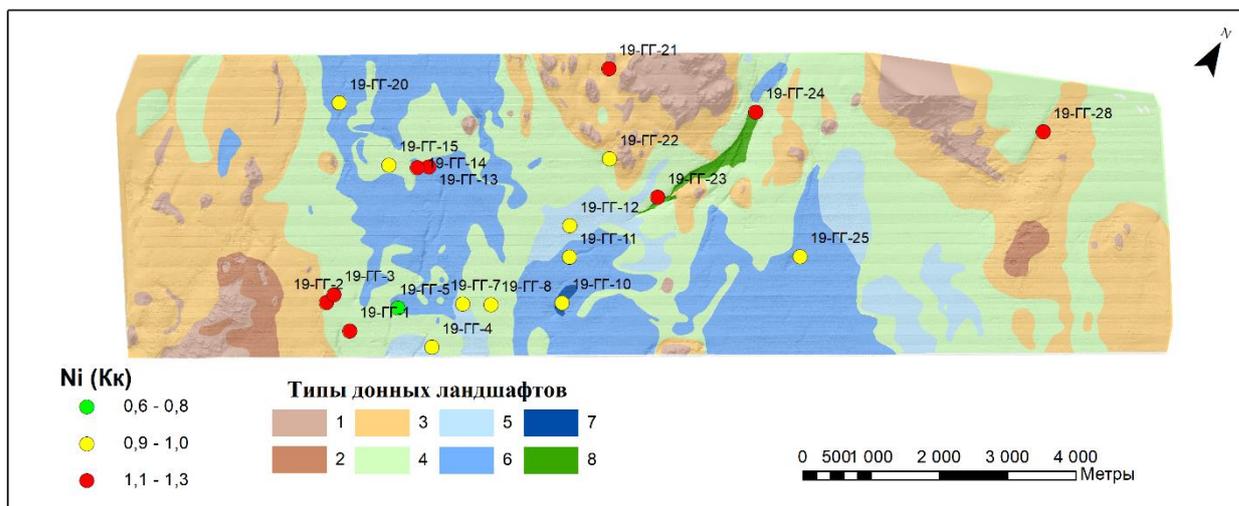


Рисунок 26. Карта распределения коэффициентов концентрации никеля в донных осадках

По содержанию свинца (II класс опасности) в донных осадках преобладающая часть площади полигона является «чистой» (рис. 27). Особенно низкая концентрация свинца наблюдается в северной части полигона и приурочена к крупнообломочным отложениям (тип ландшафта №1). Высокие концентрации свинца наблюдается в трех пробах, относящихся к типу ландшафтов №4. В них фоновая концентрация превышена в 1,7 - 2, 7 раз.

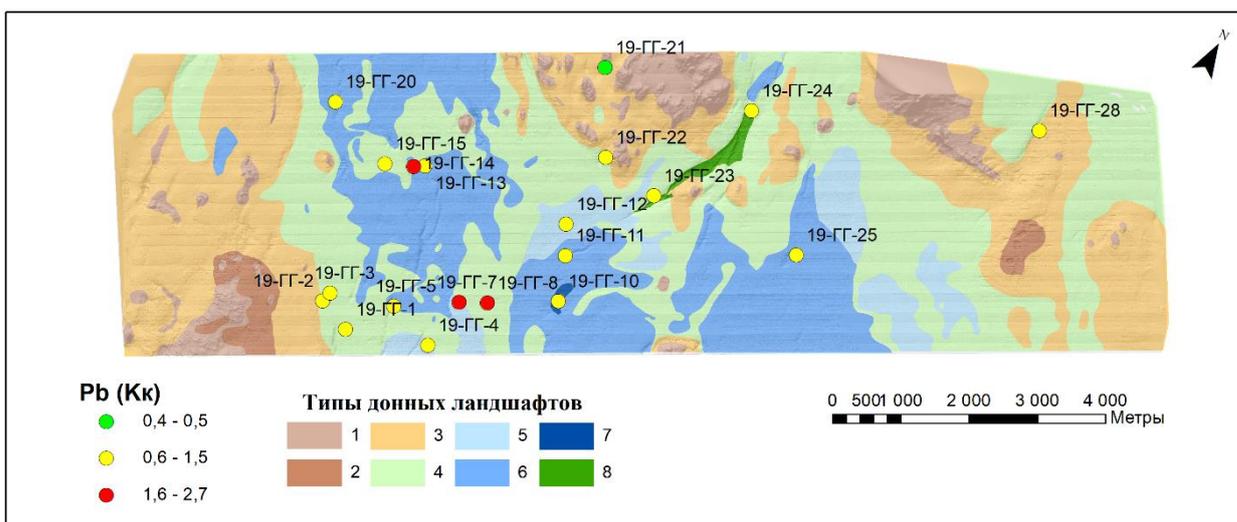


Рисунок 27. Карта распределения коэффициентов концентрации свинца в донных осадках

Так как в региональном нормативе нет стандартов для железа и марганца, на картах распределения данных элементов интервалы были выбраны вручную с учетом особенностей распределения и изменения коэффициентов концентрации. Характерной особенностью распределения железа (III класс опасности) в донных осадках полигона является увеличение его содержания от западной части участка к восточной (рис. 28). В донных осадках железо часто входит в состав железомарганцевых конкреций. Высокая концентрация железа наблюдается в пробе 19-ГГ-28, приуроченной к типу ландшафта №3. Данная концентрация превышает фоновую в 1,8 раз и не может трактоваться как загрязнение.

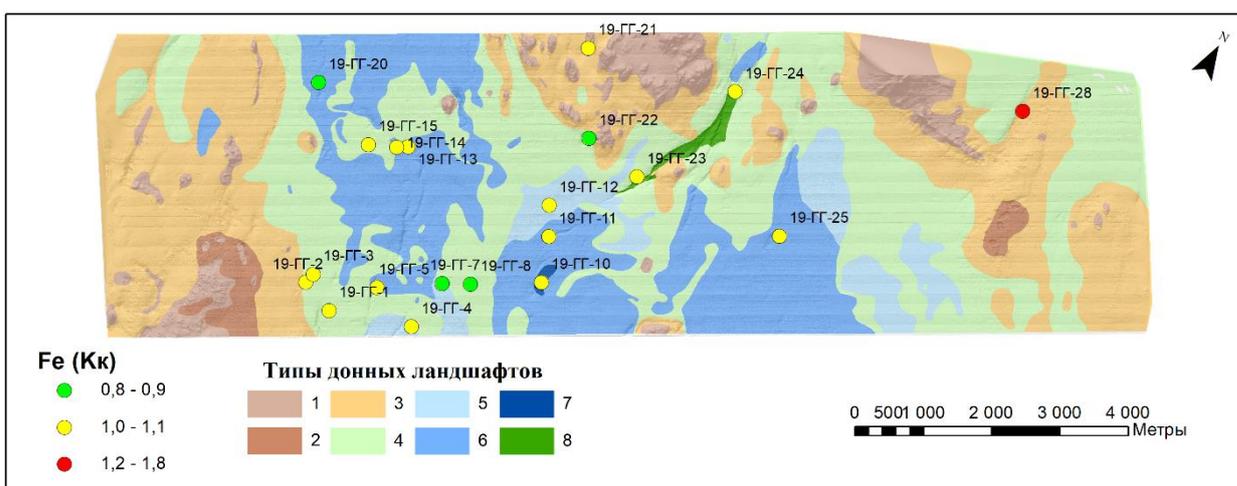


Рисунок 28. Карта распределения коэффициентов концентрации железа в донных осадках

Похожее распределение в донных осадках полигона наблюдается и у марганца (III класс опасности): увеличение концентрации марганца в донных осадках при движении от

западных ландшафтов к восточным (рис. 29). Отличительной особенностью распределения марганца является его широкий диапазон изменения коэффициентов концентрации от 0,3 до 15,8. Более 50% площади полигона покрыто донными осадками, концентрация в которых марганца превышает фоновый уровень более чем в 2 раза. Наибольшие концентрации марганца приурочены к типам ландшафтов №3 и №4.

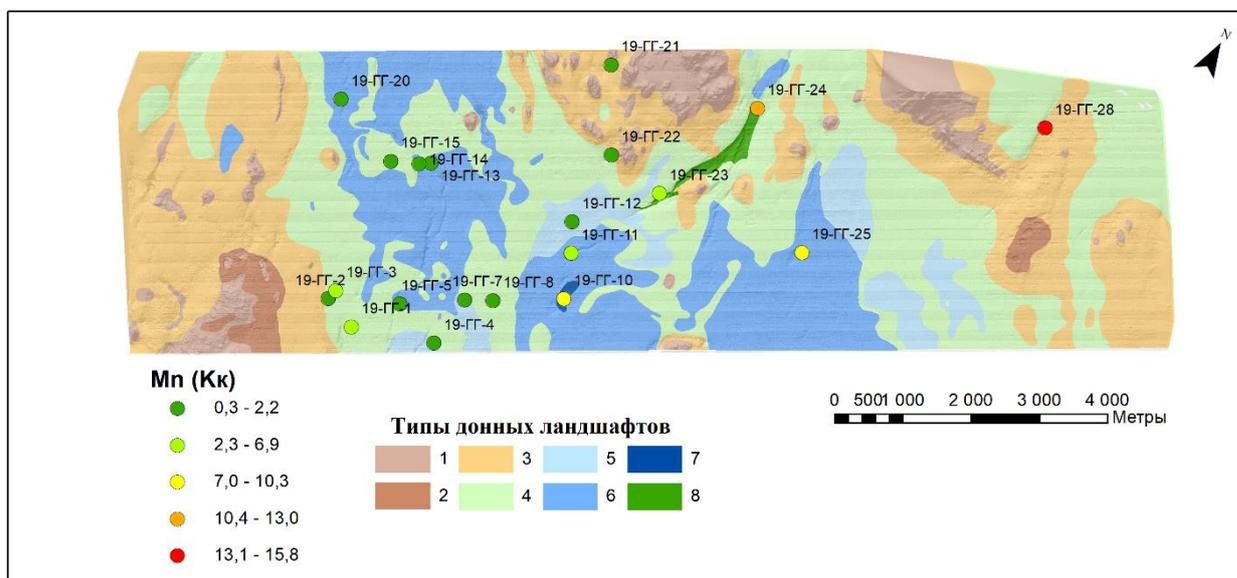


Рисунок 29. Карта распределения коэффициентов концентрации марганца в донных осадках

Таким образом, основная аккумуляция загрязняющих компонентов приходится на тип ландшафта №4, в меньшей степени №3 и №6. Четвертый и шестой типы ландшафтов территориально приурочены к бассейнам седиментации. Основными депонирующими отложениями являются алевропелитовые осадки, а также железомарганцевые конкреции. Значительные превышения фоновых концентраций отмечаются по следующим элементам: медь, свинец, марганец.

По результатам расчета суммарного показателя загрязнения Z_c (рис. 30) было установлено, что максимальное значение данного параметра приурочено к типу ландшафта №3 (проба 19-ГГ-28), высокие значения также характерны для типов ландшафтов №8 (проба 19-ГГ-24). Согласно таблице 6 загрязнения ландшафтов №3 и №8 соответствуют среднему уровню техногенного загрязнения, ландшафтов №1, №2, №4, №5, №6 и №7 - низкому уровню техногенного загрязнения.

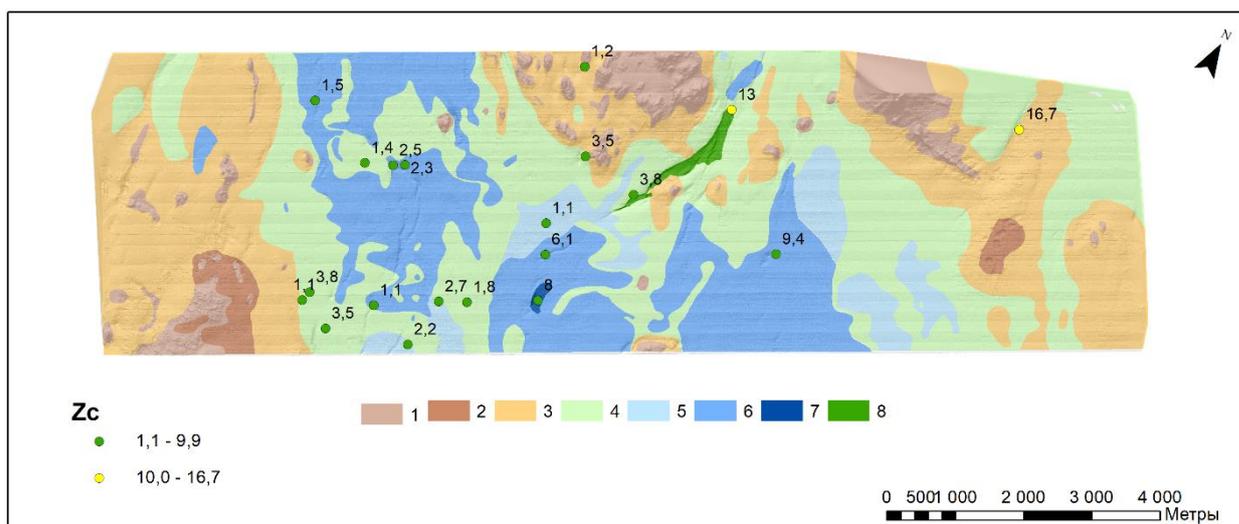


Рисунок 30. Карта распределения суммарного показателя загрязнения донных осадков

Z _c	Z _{ст}	Уровень техногенного загрязнения	Степень санитарно-токсикологической опасности	Содержание токсичных элементов в воде
<10	<10	Низкий	Допустимая	Большинство в пределах фона
10-30	10-30	Средний	Умеренная	Многие повышены относительно фона; некоторые эпизодически достигают ПДК
30-100	30-100	Высокий	Опасная	Многие элементы выше фона; некоторые превышают ПДК
100-300	100-300	Очень высокий	Очень опасная	Многие во много раз выше фона; некоторые стабильно превышают ПДК
>300	>300	Чрезвычайно высокий	Чрезвычайно опасная	Большинство во много раз выше фона; многие стабильно превышают ПДК

Таблица 6. Ориентировочная шкала оценки степени загрязнения водных объектов по концентрациям химических элементов в донных осадках (Янин, 2002)

3.3 Особенности загрязнения подводных ландшафтов с донной гипоксией

Донная гипоксия - одна из важнейших проблем Балтийского моря и, в частности, Финского залива. Гипоксией называют концентрацию кислорода в придонном слое менее, чем 2 мл/л. Анаэробные условия являются несовместимыми с жизнью для многих видов морской фауны (Vaquer-Sunyer et al., 2008), как следствие расширение площади распространения данного явления ведет к сокращению биоразнообразия и биомассы бентосных организмов. Другой вызываемый негативный эффект - дополнительное накопление тяжелых металлов в донных осадках (Поляк и др., 2018). Характерной особенностью гипоксии в Балтийском море является её эпизодическое распространение, ведущее к массовой гибели макрозообентоса и образованию обширных безжизненных пространств (Максимов, 2008).

В пределах исследуемого участка гипоксия характерна для типов ландшафтов №6 и №7. Данные ландшафты могут рассматриваться в качестве источников вторичного загрязнения морских вод металлами, в особенности медью, свинцом и марганцем, так как в условиях дефицита кислорода соединения металлов переходят в мобильные формы, растворяются железомарганцевые конкреции. Подобное загрязнение может оказывать токсическое воздействие на гидробионтов, а также человека.

3.4 Геоэкологическое районирование дна участка «Гогланд»

Для составления карты геоэкологического районирования (рис. 31) была использована методика, предложенная в статье «Геоэкологическое районирование дна восточной части Финского залива» (Буданов и др., 2019). Согласно данной методике, каждый тип ландшафта был рассмотрен с учетом шести критериев оценки экологического состояния геологической среды:

1. Геоморфологические условия;
2. Геологическое строение и тектоника;
3. Экзогенные геологические процессы;
4. Экологическая обстановка;
5. Газонасыщенность грунтов;
6. Техногенное воздействие.



Рисунок 31. Карта геоэкологического районирования

Результатом геоинформационной обработки данных о геологических, геоморфологических, литодинамических, экологических и других условиях акватории восточной части Финского залива явилось ранжирование данных по каждому из критериев с использованием балльной системы: благоприятные условия соответствуют 1 баллу; потенциально опасные – 2 баллам; опасные – 3 баллам. По результатам суммирования полученных баллов была создана шкала опасности\безопасности геоэкологических условий со следующими диапазонами значений: 7-8 (безопасные), 9-10 (потенциально опасные), 11-13 (опасные).

Согласно данной классификации, типы ландшафтов №1 и №2 характеризуются безопасными геоэкологическим условиями, обусловленными отсутствием экзогенных процессов и алевропелитовых осадков, концентрирующих загрязняющие вещества, приуроченностью к выходам морены на поверхность дна. Потенциально опасными были признаны типы ландшафтов №3, №4 и №5, для которых характерно наличие загрязненных алевропелитовых илов, а также зон развития погребенных врезов. Геоэкологические условия типов ландшафтов №6, №7 и №8 являются опасными, что обусловлено наличием газонасыщенных алевропелитовых илов и геологическим строением данных участков; воздействие контуритового течения на ландшафт №8 дополнительно влияет на отнесение его к классу опасных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате исследования восточной части Финского залива на примере участка у о. Гогланд была проведена эколого-геологическая оценка изученной территории. Для картирования донных ландшафтов были отобраны следующие типы данных: географические координаты, глубина, солёность вод, содержание кислорода на границе вода-дно, характер поверхностных донных осадков, макрозообентос. После обработки полученных данных была создана ландшафтная карта исследуемого участка, в пределах которого было выделено 8 типов ландшафтов. Для изучения распределения тяжелых металлов (железо, марганец, медь, свинец, никель, цинк, мышьяк) в донных осадках был произведен пробоотбор 23 образцов.

По результатам математико-статистического и рентгенофлуоресцентного анализов, а также обработки геоданных в программе ArcGIS были сделаны следующие выводы:

1. Созданная ландшафтная карта показала, что наиболее пригодным для живых организмов является тип ландшафта №4 - среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов с примесью песка, а наименее пригодным – тип №7 - низкоэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов, анаэробные условия.
2. Содержание мышьяка во всех пробах одинаково (5 г/т) и находится ниже предела чувствительности прибора. Данное содержание мышьяка в донных осадках позволяет охарактеризовать последние как чистые отложения.
3. Согласно диаграммам «ящик с усами» экстремальные значения содержания тяжелых металлов в пробах отмечаются для железа, марганца, меди, свинца.
4. По результатам факторного анализа было выявлено два фактора, влияющих на распределение тяжелых металлов в донных осадках. Их суммарная дисперсия составляет 51%.
5. Основная аккумуляция загрязняющих компонентов приходится на тип ландшафта №4, в меньшей степени №3 и №6. Основными депонирующими отложениями являются алевропелитовые осадки, а также железомарганцевые конкреции.
6. Значительные превышения фоновых концентраций отмечаются по следующим элементам: медь (максимальный $K_K=3,4$), свинец (максимальный $K_K=2,7$), марганец (максимальный $K_K=15,8$).
7. Типы ландшафтов №6 и №7 могут рассматриваться в качестве источников вторичного загрязнения морских вод металлами, в особенности медью, свинцом и марганцем, так как для них характерна гипоксия.

8. Максимальное значение суммарного показателя загрязнения приурочено к типу ландшафта №3 ($Z_c=16,7$) и №8 ($Z_c=13,0$), которые могут быть охарактеризованы как ландшафты средне загрязненные.
9. Согласно критериям оценки экологического состояния геологической среды типы ландшафтов №1 и №2 характеризуются безопасными геоэкологическими условиями, №3, №4 и №5 - потенциально опасными, №6, №7 и №8 - опасными.
10. По результатам проведенной комплексной эколого-геологической оценки ландшафты исследуемого участка были дифференцированы следующим образом: тип №1 - относительно незагрязненный ландшафт; тип №2 - относительно незагрязненный ландшафт; тип №3 - умеренно загрязненный ландшафт; тип №4 - умеренно загрязненный ландшафт; тип №5 - умеренно загрязненный ландшафт; тип №6 - ландшафт с потенциально возможным загрязнением; тип №7 - ландшафт с потенциально возможным загрязнением; тип №8 - ландшафт с потенциально возможным загрязнением.

В соответствии с полученными результатами были составлены следующие рекомендации:

1. Необходима разработка стандартов качества донных осадков для морских акваторий, принадлежащих РФ.
2. Необходима организация мониторинга за состоянием и качеством морских вод и донных осадков вследствие увеличения антропогенной эвтрофикации акваторий, которая является причиной увеличения площадей распространения гипоксии.

Часть результатов, полученных в ходе проведения данной исследовательской работы, была представлена в виде тезисов на международной конференции GEOHAB-2019 (Морское геологическое и биологическое картографирование местообитаний), проходившей 13-17 мая 2019 г. в Санкт-Петербурге:

- Kobik L., Ryabchuk D., Orlova M., Ezhova E., Sergeev A., Zhamoida V., Molchanova N., Kocheshkova O., Krek A., Kretchik V. Benthic landscape mapping of submerged end-moraine ridge slope in Vyborg Bay (Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea) based on multibeam echosounder dataset. // Annual conference GEOHAB 2019 - Marine geological and biological habitat mapping. - SPb.: VSEGEI, 2019. P. 108-109
- Neevin I., Zhamoida V., Ezhova E., Orlova M., Ryabchuk D., Kobik L., Sergeev A., Molchanova N., Kocheshkova O., Krek A., Kretchik V. Submarine landscapes of gas-saturated sediment fields of the Eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) // Annual conference

GEOHAB 2019 - Marine geological and biological habitat mapping. - SPb.: VSEGEI, 2019. P. 142-143

- Orlova M., Ryabchuk D.V., Ezhova E., Evdokimenko A.V., Neevin I.A., Kobik L., Sukhacheva L., Bubnova E., Budanov L.M., Kocheshkova O., Krek A., Molchanova N., Sergeev A.Yu., Zhamoida V.A. 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. - SPb.: VSEGEI, 2019. P. 148-149

Автор выражает благодарность Шутову Александру, Терещенко Наталии и Копыловой Веронике за помощь в пробоподготовке; научным сотрудникам ВСЕГЕИ Евдокименко Антону и Сергееву Александру за помощь и советы по созданию карт; Лебедеву Сергею Васильевичу за советы по интерполяции данных; Иванюковичу Георгию Александровичу за обучение работе в программе Statistica; Сафарову Александру Ризаевичу за руководство в процессе измерения содержания тяжёлых металлов в пробах донных осадков. Спасибо научному руководителю Беляеву Анатолию Михайловичу. Отдельную благодарность хочется выразить Рябчук Дарье Владимировне за предоставление ресурсов и материалов, за переданные на протяжении трех лет знания и опыт, за ценные наставления и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. О. В. Петров. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.
2. Богданов А. А. Тектоническая история территории СССР и сопредельных стран, «Вестник МГУ. Серия IV. Геология», 1968, №1.
3. Буданов Л. М. Геоэкологическое районирование дна восточной части Финского залива / Л. М. Буданов, А. Ю. Сергеев, Д. В. Рябчук, В. А. Жамойда, В. И. Хориков // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 79. – С. 23–34.
4. Геология Балтийского моря. Под ред. В.К.Гуделиса и Е.М.Емельянова, 1976. - Вильнюс: Моклас. - 370 с.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 1. Балтийское море. Вып. 1. Балтийское море без заливов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983, 175 с.
6. Национальный атлас России Том.2. Природа и экология / А. А. Ключко, М. А. Романовская, М. Г. Гречушникова, и др. — ФГУП "ГОСГИСЦЕНТР" Москва, 2004. — 495 с.
7. Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет. Атлас-монография, 1982. - М.: Наука. - 156 с.
8. Зиганшин И.И. Донные отложения озер Республики Татарстан: дис. канд. геогр. наук: 25.00.23 / Ярославль, 2005, 182 с.
9. Максимов А.А. Влияние климатических факторов на динамику макрозообентоса // В кн.: Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. С. 346–355.
10. Максимов А.А. Крупномасштабная инвазия *Marenzelleria* spp. (Polychaeta, Spyonidae) в восточной части Финского залива Балтийского моря. // Российский Журнал Биологических Инвазий, 2010. № 4, с. 19-31.
11. Мануйлов В. А. Изучение донных природных комплексов верхнего шельфа залива Петра Великого (для обоснования размещения хозяйств марикультуры)/ В. А. Мануйлов // Вестн. Моск. ун-та. – Сер. 5. География, 1982. - №1 – с.48-52.
12. Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив, разработанный в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1 — СПб., 1996 — 20 с.
13. 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.

14. Преображенский Б.В., Жариков В.В., Дубейковский Л.В. Основы подводного ландшафтоведения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 351 с.
15. Соболев В.И. Качественный рентгенофлуоресцентный анализ: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Физико-химические методы анализа» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 240501 «Химическая технология материалов современной энергетики» / В.И. Соболев Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 18 с.
16. Сивков В.В., Дорохов Д.В., Дорохова Е.В., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю. Абиотический подход к картированию донных ландшафтов в Российских секторах Балтийского моря // Региональная экология, 2014. № 1-2(35), с. 156-165.
17. Спиридонов М.А. Ледниковая история Финского залива. // В кн.: Геология субквальной части зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты в пределах Финского залива. Сб.науч.трудов, 1989. – Л.: изд-во ВСЕГЕИ. - с.23-32.
18. Спиридонова Е.А., Заррина Е.П., Краснов И.И. Межстадиальные и стадиальные осадки ранневалдайского возраста в разрезе у дер. Черменного Ярославской области (северо-запад европейской части СССР). Вып.10, 1967. - Л.: изд-во ВСЕГЕИ. - с.29-40.
19. Степанова Н.Ю. Обзор существующих подходов к нормированию качества донных отложений// Успехи современной биологии, 2014, том 134, №6, с. 605-613.
20. Четвертичное оледенение на территории СССР. Отв.ред. А.А.Величко, Л.Л.Исаева, М.А.Фаустова, 1987. - М.: Наука. - 127 с.
21. Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Типы и факторы загрязнения восточной части Финского залива и его береговой зоны // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2015. №176.
22. Ширкин Л. А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды: учеб. пособие / Л. А. Ширкин; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 60 с.
23. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.
24. Al-Hamdani Z., Reker J., Towards marine landscape in the Baltic Sea, BALANCE Interim report №10, 2007, 116 с.
25. Breilin O., Kotilainen A., Nenonen K., Virransalo P., Ojalainen, J. & Stén, C.-G. Geology of the Kvarken Archipelago, 2004.
26. Deckere E., De Cooman W, Leloup V. et al. Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // J. Soils Sediments. 2011. № 11. P. 504–517.
27. Harff J., Bjorck S., Hoth P. The Baltic Sea Basin. Springer, 2011, с. 449.

28. Kaskela A.M., Rousi H., Ronkainen M., Orlova M., Babine A., Gogoberidze G., Kostamo K., Kotilainen A.T., Neevin I., Ryabchuk D., Sergeev A., Zhamoida V. Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: the role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems // *Continental Shelf Research*, 2017, c. 1-13.
29. Long E.R., Morgan L.G. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52 / National Oceanic and Atmospheric Administration. Seattle WA, 1991. 175 c.
30. Ryabchuk D., Sergeev A., Zhamoida V., Budanov L., Krek A., Neevin I., Bubnova E., Danchenkov A., Kovaleva O. High resolution geological mapping – towards understanding of postglacial development and Holocene sedimentation processes in the eastern Gulf of Finland (EMODnet-geology case study), 2020 (в печати).
31. 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, 8, 102
32. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 2000, №39: c. 20–31.
33. Vaquer-Sunyer R., Duarte C.M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2008, 105, 15452– 15457.
34. Vallius H. Arsenic and heavy metal distribution in the bottom sediments of the Gulf of Finland through the last decades // *Baltica*, 2012, №25 (1), c. 23–32.
35. Schneider B., Müller D. Biogeochemical Transformations in the Baltic Sea. Observations Through Carbon Dioxide Glasses. Springer International Publishing, 2017. 110 c.
36. Smith S.L., McDonald D.D., Keenleyside K.A. et al. A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems // *J. Great Lakes Res.* 1996. V. 22. P. 624–638.
37. WGMS 2003. Report of the Working Group on Marine Sediments in Relation to Pollution. ICES CM 2003/ E:04

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Классификация донных ландшафтов участка «Гогланд»

Солёность	Интенсивность волнового воздействия	Батиметрическое положение	Влияние волн и течений	Динамический тип субстрата	Поверхностные отложения	Тип биологического сообщества	Сообщества	Виды-доминанты	Содоминирующие виды	Название типа ландшафта
Олигохалинный тип (солёность 0,5 – 5 ‰)	Незащищенный (подверженный воздействию)	Циркалитораль: постоянно погруженный в воду субстрат в отсутствие достаточного для автотрофного образа жизни уровня света (>10 м)	Средний уровень Воздействия течений (20-65 м)	Сочетание подвижного и неподвижного типов субстрата	Валуны, галька и плотная глина, покрытые гравийно-песчаной смесью	Макрозообентос	Monoporeia affinis, Marenzelleria arctica, Saduria entomon, Oligochaeta (средняя численность)	Monoporeia affinis	Marenzelleria arctica	Среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития миктитов с железомарганцевыми конкрециями (18-ГГ-27)
					Валуны, галька, крупные корки железомарганцевых конкреций с песком	Макрозообентос	Marenzelleria arctica, Oligochaeta, Limecola balthica, Monoporeia affinis (средняя численность)	Marenzelleria arctica	Oligochaeta	Среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития миктитов с крупными корками железомарганцевых конкреций (18-ГГ-24, 18-ГГ-26, 17-ГГ-6)
				Подвижный субстрат	Алевропелиты с примесью песка на	Макрозообентос	Marenzelleria arctica, Limecola balthica, Monoporeia affinis,	Marenzelleria arctica	Oligochaeta или Monoporeia	Среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых

					эрозионной поверхности плотных плейстоценовых глин		Oligochaeta, Saduria entomon (численность от средней до высокой)		eia affinis	илов с примесью песка и железомарганцевыми конкрециями, залегающая на поверхности размыва плотных глин, аэробные условия (18-ГГ-7, 17-ГГ-4, 18-ГГ-2)
					Алевропелиты с примесью песка, залегающие на голоценовых алевроглинах	Макрозообентос	Marenzelleria arctica, Limecola balthica, Monoporeia affinis, Saduria entomon, Oligochaeta (наиболее высокая численность)	Marenzelleria arctica	Oligochaeta или Limecola balthica	Среднеэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов с примесью песка; аэробные условия (18-ГГ-14)
		Низкий уровень воздействия (> 65 м)	Подвижный субстрат		Алевропелитовые илы с высоким содержанием метана	Макрозообентос	Limecola balthica, Marenzelleria arctica (средняя численность)	Limecola balthica	Marenzelleria arctica	Низкоэнергетическая циркулитораль в зонах развития алевропелитовых илов; аэробные условия
					Алевропелитовые илы, аэробные условия	Макрозообентос	Marenzelleria arctica, Monoporeia affinis (низкая численность)	Marenzelleria arctica	Monoporeia affinis	

				Алевропелитовые илы, в преимущественно анаэробные условия	Почти безжизненный	Marenzelleria arctica, Saduria entomon (очень низкая численность)	Marenzelleria arctica	-	Низкоэнергетическая циркулиторадь в зонах развития алевропелитовых илов; преимущественно анаэробные условия (18-ГГ-13)
				Алевропелитовые илы, анаэробные условия	Безжизненный	Нет	Нет	Нет	Низкоэнергетическая циркулиторадь в зонах развития алевропелитовых илов; анаэробные условия (18-ГГ-6)
		Высокий уровень воздействия течений (контуриты) (> 70 м)	Подвижный субстрат	Алевропелитовые илы, содержащие песчаные частицы и железомарганцевые конкреции (местами), аэробные условия	Почти безжизненный	Marenzelleria arctica, Saduria entomon (очень низкая численность)	Marenzelleria arctica	-	Высокоэнергетическая циркулиторадь в зонах развития алевропелитовых илов; аэробные условия на дне подводных ложбин контуритовых течений (18-ГГ-16, 18-ГГ-21, 17-ГГ-2, 17-ГГ-14, 17-ГГ-12)

Содержание тяжелых металлов в донных осадках согласно данным
рентгенофлуоресцентного анализа

Проба	Тип	Fe, ppm	Ni, ppm	Mn, ppm	As, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm	Pb, ppm
19-ГГ-1	4	90159	47	10492	5	199	48	55
19-ГГ-2	4	82470	49	1327	5	116	49	41
19-ГГ-3	4	90795	47	11363	5	205	57	46
19-ГГ-3	4	75609	50	1263	5	130	50	28
19-ГГ-4	5	88072	39	6692	5	191	65	53
19-ГГ-4	5	78199	33	2497	5	188	64	62
19-ГГ-5	6	86009	28	3100	5	194	67	61
19-ГГ-7	4	71252	37	1143	5	152	54	152
19-ГГ-8	4	67771	44	856	5	104	47	104
19-ГГ-10	7	85374	39	24457	5	200	73	55
19-ГГ-11	6	89915	42	18132	5	202	74	57
19-ГГ-12	5	77622	38	1287	5	207	62	62
19-ГГ-13	6	84771	59	4315	5	238	76	67
19-ГГ-14	4	86890	59	2999	5	266	77	93
19-ГГ-15	4	80966	37	1842	5	220	76	61
19-ГГ-20	6	76006	40	1243	5	239	67	70
19-ГГ-21	1	87727	50	936	5	134	58	25
19-ГГ-22	4	71894	36	2997	5	198	224	53
19-ГГ-23	8	82659	49	10498	5	234	69	59
19-ГГ-24	8	89129	52	39325	5	195	56	64
19-ГГ-25	6	91840	41	28300	5	197	75	51
19-ГГ-28	3	153168	47	48992	5	163	37	41
19-ГГ-28	3	153168	47	48992	5	128	65	34

Критерии оценки экологического состояния геологической среды

Критерий	Безопасные	Потенциально опасные	Опасные
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 дна (или близко к ней) морен, мощность послеледниковых отложений меньше 10 м, отложения современных илов отсутствуют	Мощность послеледниковых отложений больше 10 м, отложения современных илов отсутствуют	Мощность послеледниковых отложений больше 10 м, 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	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

	поверхностных отложений		
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 (существенные изменения геологической среды)