

На правах рукописи

**КРЕК Александр Владимирович**

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ЮГО-  
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

1.6.21 – Геоэкология (географические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Калининград – 2022

Работа выполнена в лаборатории геоэкологии Атлантического отделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Сивков Вадим Валерьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, директор АО ИО РАН

**Официальные оппоненты:** **Рыбалко Александр Евменьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ВНИИОкеангеология, главный научный сотрудник

**Шилин Михаил Борисович**, доктор географических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского»

Защита состоится «29» августа 2022 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.273.01 при ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, ауд. Скворечник, e-mail: tikuznetsova@kantiana.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград, ул. Университетская, д. 2). Электронные версии диссертации и автореферата размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»: <https://kantiana.ru/postgraduate/dis-list/krek-aleksandr-vladimirovich/>

Автореферат разослан                      мая 2022г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Т.Ю. Кузнецова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Наиболее опасными для устойчивого развития морских экосистем являются тяжелые металлы (ТМ) (Gerlach, 1981; Nemerow, 1991; Leivuori, 2000; Swedish EPA, 2000; Трофимов, Зилинг, 2002; De Mora et al., 2004; HELCOM, 2010; Uścińowicz et al., 2011), а их повышенное содержание в донных осадках может приводить к вторичному загрязнению вод (Sokolowski et al., 2001) и вызывать существенные изменения в живых организмах и пищевых цепях (Kersten et al., 1994; HELCOM, 2007). Проблема загрязнения ТМ существует во всем Мировом океане, например, в Северо-Восточной Атлантике (Rodrigues et al., 2009), Восточно-Китайском (Daoji, Daler, 2004), Каспийском (Bastami et al., 2015; Abadi et al., 2019), Гренландском (Neff, 2002), Северном, Средиземном, Черном и Балтийском морях (Tornero, Hanke, 2016; AYTEKIN et al., 2019).

Возрастание антропогенной нагрузки приводит к увеличению поступления потенциально опасных веществ (ПОВ) и закономерным изменениям окружающей среды (Cox and Preda, 2005; Gonzalez-Mendoza et al., 2007; Yurkovskis and Poikane, 2008; Dias et al., 2009; HELCOM, 2010; Garnaga, 2012; Yan et al., 2015). Обладая меньшей изменчивостью, чем водная толща, донные осадки отражают интегральные изменения, происходящие в акватории (Clifton, Hamilton 1979; Brugmann 1981; Bryan et al., 1985; Szefer Skwarzec, 1988; Szefer 1998; Szefer et al., 1998).

Балтийское море является одной из самых загрязненных акваторий в мире, а его экосистема крайне чувствительна к природным и антропогенным воздействиям (Dybern, Fonselius, 1981; Borg and Jonsson 1996; Conley et al., 2002; HELCOM, 2003, 2010, 2018; Lehtonen et al., 2006; Carstensen et al., 2014a). В связи с этим Хельсинской комиссией были предприняты некоторые меры, направленные на уменьшение его загрязнения (HELCOM, 2018).

Интенсивность хозяйственной деятельности в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря также постоянно возрастает в связи с разведкой и разработкой нефтяных месторождений, капитальным строительством, поиском песчано-гравийных полезных ископаемых и судоходством. В береговой зоне моря происходит сброс сточных вод (Емельянов и др., 2012; Ulyanova and Danchenkov, 2016; Krek et al., 2018). Все это приводит к

поступлению в Балтийское море потенциально опасных веществ и появлению аномалий содержания ТМ в донных осадках, изучение которых необходимо для оценки роли хозяйственной деятельности в изменении окружающей среды и определения допустимости такого воздействия. До настоящего времени оценки загрязнения донных осадков района исследований сводились к количественному описанию содержания химических элементов и соединений в различных типах осадков (Лукашин, 1986; Емельянов, 1986, 1987, 1998; Emelyanov et al., 2002; Емельянов и др., 2012). Интегральная оценка загрязнения различных типов донных осадков юго-восточной части Балтийского моря не выполнялась.

**Степень изученности проблемы.** Загрязняющие вещества попадают в Мировой океан, в основном, с материковым стоком, абразионным материалом, атмосферным переносом и непосредственно при ведении хозяйственной деятельности на акватории. Вместе со взвешенным веществом, обладающим высокой сорбционной способностью, ПОВ поступают в донные осадки, где накапливаются (McCave, 1984; Szefer et al., 1995; Kennish, 1997; Pempkowiak et al., 1998, 1999; Rubio et al., 2000; Emelyanov et al., 2002; Beldowski and Pempkowiak, 2003; Ruiz-Fernández et al., 2004; Roussiez et al., 2005; Álvarez-Iglesias et al., 2007; Ducrotoy and Elliott, 2008; Diaz-Asencio et al., 2009; Uścińowicz et al., 2011; Zaborska et al., 2014; Nemirovskaya et al., 2014; Remeikaitė-Nikienė et al., 2017). Загрязнение донных осадков ТМ в Балтийском море является общепринятой проблемой (Anon, 1990; Glasby, Szeffer, 1998; HELCOM, 1993; Szeffer et al., 1995, 1996; Witkowski, Pempkowiak 1995; Belzunce et al., 2007).

В России отсутствуют утвержденные нормативы загрязнения донных осадков, что значительно затрудняет контроль воздействия хозяйствующих субъектов на акваторию. Кларковые значения ТМ не отражают специфику регионального фона, как и шкалы загрязнения, используемые в других странах Балтийского региона, например, Швеции (Swedish EPA, 2000; WGMS, 2003). Разработка региональных нормативов (критериев), устанавливающих загрязнение осадков и учитывающих местные особенности, позволит более достоверно оценивать воздействие их источников на окружающую среду.

**Цель работы:** выявление особенностей пространственно-временной динамики накопления тяжелых металлов для научного обоснования критериев

оценки загрязнения тяжелыми металлами донных осадков в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря.

**Задачи:**

1. Изучение мирового опыта оценки и анализ данных по степени загрязнения донных осадков ТМ;
2. Статистическая обработка данных по содержанию ТМ в донных осадках за период 2011-2020 гг.
3. Интегральная оценка загрязнения ТМ различных типов донных осадков, выявление геохимических аномалий, количественная оценка их связи с природными и антропогенными источниками.
4. Пространственная оценка переноса Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg в береговой зоне на примере анализа аномалии содержания у Куршской косы.
5. Выявление критериев региональной классификации загрязнения донных осадков.

**Объект исследования:** ТМ в донных осадках российского сектора юго-восточной части Балтийского моря.

**Предмет исследования:** пространственно-временные особенности формирования геохимических аномалий ТМ с учетом природно-антропогенного фона в донных осадках.

**Научная новизна.** Впервые для юго-восточной части Балтийского моря были выявлены геохимические аномалии и сопоставлены уровни загрязнения ТМ илистых и обломочных осадков. Применение метода нормализации (приведение содержания ТМ к природному макроэлементу – Fe) позволило впервые достоверно количественно сопоставить уровень загрязнения илистых и обломочных осадков. Используемые методы позволили дифференцировать природные и антропогенные источники образования геохимических аномалий. Впервые для региона дана количественная оценка вклада отдельных источников в загрязнение донных осадков (морской ледостойкой стационарной платформы – МЛСП D-6, сброса вскрышных пород Янтарного комбината и др.). Отклонение содержания ТМ от региональных фоновых значений позволило выявить пять классов уровней загрязнения, которые в дальнейшем предлагается использовать в качестве региональных нормативов.

**Практическая значимость.** Оценка природного фона и вклада потенциальных источников геохимических аномалий ТМ в донных осадках российского сектора юго-восточной части Балтийского моря – важный элемент морского пространственного планирования. Полученные результаты обосновывают несовершенство существующих методов морского геоэкологического мониторинга. Предложенный автором комплексный подход по выявлению повышенных содержаний потенциально опасных веществ может быть использован для усовершенствования правил инженерных изысканий в строительстве (СП 47.13330.2016).

**Фактический материал и методы исследования.** Пробы донных осадков были отобраны в экспедициях Атлантического отделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (АО ИО РАН) и общества с ограниченной ответственностью «Морское венчурное бюро» (ООО «МВБ»). В работу вошли материалы, полученные в рамках выполнения государственного задания АО ИО РАН в 2014-2020 гг., а также материалы экологического мониторинга нефтяного месторождения D-6 с 2003 г. и материалы, полученные в ходе инженерных изысканий при поисково-разведочном бурении на шельфе Калининградской области за период 2011-2020 гг. Лабораторный анализ включал определение гранулометрического, минералогического и химического составов донных осадков. Статистические методы заключались в нормализации содержания ТМ к Fe и дальнейшему расчету экологических индексов. Для установления генезиса геохимических аномалий был выполнен кластерный анализ и расчет вдольберегового движения наносов. Широко использовался картографический метод. Работа выполнена в лаборатории геоэкологии АО ИО РАН.

**Личный вклад автора.** Автором проанализирована литература по тематике исследования, спланирован и выполнен отбор проб донных осадков, проинтерпретированы результаты лабораторных исследований, предложен подход оценки степени загрязнения донных осадков по тонкодисперсной фракции осадка. В качестве обобщающего итога автором предложена адаптированная к

региональным условиям методика определения уровня антропогенного воздействия на донные осадки.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. В современных донных осадках российского сектора юго-восточной части Балтийского моря периодически формируются временные антропогенные аномалии содержания тяжелых металлов Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As вблизи объектов инфраструктуры морской нефтедобычи (нефтедобывающая платформа и подводный трубопровод), в районе Национального парка «Куршская коса» и у северного побережья Калининградского полуострова.

2. Геохимическая аномалия Pb, Cu, Ni, Zn в осадках плато Рыбачий обусловлена вдольбереговым переносом от Калининградского полуострова на северо-восток вдоль Куршской косы.

3. Ассоциация Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Zn у западного побережья Калининградского полуострова идентична по составу вскрышным породам Приморского месторождения янтаря и соответствует природному геохимическому фону донных осадков.

4. В голоценовых илах Гданьской впадины проявляются природные геохимические аномалии Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb, обусловленные разгрузкой подземных вод оксфорд-титонского горизонта.

5. Региональная шкала загрязнения донных осадков, включающая пять классов загрязнения тяжелыми металлами, позволяет наиболее достоверно оценивать последствия хозяйственной деятельности и учитывать геоэкологические риски.

**Соответствие паспорту специальности.** Исследование соответствует паспорту специальности 1.6.21 – Геоэкология (географические науки) по пунктам 1.8, 1.17, 1.18.

**Апробация результатов.** Результаты исследования представлены на Международных научных конференциях EMECS'11 – SeaCoasts XXVI (Санкт-Петербург, 2016), 14<sup>th</sup> Colloquium on Baltic Sea Marine Geology (Худдинге, 2018), ГЕОНАВ (Морское геологическое и биологическое картографирование местообитаний, Санкт-Петербург, 2019 г.); Международном конгрессе International Union for Quaternary Research (Дублин, 2019 г.); Международной

научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения (Санкт-Петербург, 2021 г.); Всероссийских конференциях «Итоги экспедиционных исследований на научных судах ФАНО России» (Москва, 2018 г.), Четвертые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г.Е. Гришанкову «Ландшафтоведение и ландшафтная экология: коадаптация ландшафта и хозяйственной деятельности» (Симферополь, 2020 г.), «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (XXVIII береговая конференция, Севастополь 2020 г.), «Итоги экспедиционных исследований в 2019 г. в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген» (Москва, 2020 г.). Результаты данной работы использовались в ходе инженерно-экологических изысканий в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, а также включенных в базы цитирования WoS/Scopus.

**Благодарности.** Автор благодарен сотрудникам АО ИО РАН и ООО «МВБ» (Калининград) за возможность выполнения исследования и предоставленные материалы, а РФФИ за поддержку грантов № 17-305-50014 мол\_нр и №19-45-390007 г\_а по теме диссертации.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 179 страниц, включая 36 таблиц, 33 рисунка и 10 приложений. Список литературы включает 228 наименований, из которых 134 – на иностранных языках.

Во введении охарактеризована актуальность темы исследования, определены цель и задачи, дана оценка научной новизны и значимости исследования. В главе 1 приводится литературный обзор изученности загрязнения донных осадков Балтийского моря, в частности района исследований. Приводятся основные существующие методы и подходы для оценки степени загрязнения донных осадков ТМ. Особое внимание уделяется подходам, используемым в странах Балтийского моря. В главе 2 описываются использованные в работе материалы и методы. Для сравнения содержания ТМ в донных осадках разного гранулометрического состава устранялся эффект зависимости содержания химического компонента от размера частиц осадка. Для этого значения ТМ в образце приводили к безразмерным величинам по отношению к макроэлементу (в

данном случае к Fe), накапливаемому нормально в природных условиях (Uściłowicz et al., 2011). Основой такого типа нормализации являются достоверные представления о том, что содержание макроэлемента является результатом естественных процессов и того факта, что в осадках существует линейная зависимость между содержанием определенного ТМ и содержанием агента нормализации. В главе 3 представлены результаты анализа содержания ТМ в донных осадках и выявления геохимических аномалий ТМ вблизи антропогенных источников, у Куршской косы и в илах Гданьской впадины. В главе 4 рассматривается роль природных факторов в образовании аномалии в илах Гданьской впадины и пространственно-временной трансформации аномалии около побережья Куршской косы. В главе 5 по результатам анализа полученных данных о состоянии природно-антропогенного фона района исследования и выявления геохимических аномалий различного происхождения и масштаба предложена региональная шкала оценки загрязнения ТМ донных осадков юго-восточной части Балтийского моря, основанная на пространственно-временной динамике ТМ по отношению к природному фону.

### **Основные защищаемые положения**

**1. В современных осадках российского сектора юго-восточной части Балтийского моря периодически формируются временные антропогенные аномалии содержания тяжелых металлов Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As вблизи объектов инфраструктуры морской нефтедобычи (нефтедобывающая платформа и подводный трубопровод), в районе Национального парка «Куршская коса» и у северного побережья Калининградского полуострова.**

*1. Аномалия вблизи Куршской косы.* В 2014 г. была околнурена геохимическая аномалия вблизи Куршской косы, где содержания Pb, Cu, Ni, Zn и Cd значительно превышали фоновые значения, установленные в ходе многолетнего (2003-2020 гг.) экологического мониторинга. По экологическому индексу mCd (Abraham, 2005; Abraham, Parker, 2008) аномалия соответствовала очень высокой и сверхвысокой степени загрязнения (рис. 1). Следует отметить, что в 2013-2014 гг. в районе Куршской косы в ходе экологического мониторинга нефтедобычи на месторождении Кравцовское так же отмечались концентрации

Cu, относящиеся к 4 и 5 классу загрязнения (в 2013 г. – 110 и 200 мг/кг, в 2014 г. – 110 и 300 мг/кг, около пос. Морское и около пос. Рыбачий, соответственно по WGMS (2003). В 2015-2020 гг. такой аномалии отмечено не было, что связано с ее постепенной локализацией и исчезновением.

2. *Аномалия на подводном склоне северной части Калининградского полуострова.* Различие в гранулометрическом составе образцов не позволяет корректно сравнить результаты. Основное значение в распределении ТМ имеет гранулометрический состав, а именно, наличие фракции <0,063 мм, обладающей наибольшей сорбционной способностью (Szefer et al., 1995; Емельянов, 1998; Pempkowiak et al., 1998, 1999; Beldowski and Pempkowiak, 2003; Zaborska et al., 2014). Чтобы привести полученные результаты для объективного сравнения содержания ТМ в каждой пробе к единому знаменателю, все результаты исследований были приведены к фракции <0,063 мм путем соотношения абсолютного содержания ТМ в пробе к процентному содержанию частиц диаметром <0,063 мм.

Расчет экологических индексов CF (Hakanson, 1980) и mCd (Abraham, 2005; Abraham, Parker, 2008) позволил выявить 3 района загрязнения на Калининградском полуострове.

1) Район съезда автотранспорта на пляж и стоков в пос. Филино и пос. Приморье – от очень высокой степени загрязнения до чрезвычайно высокой степени загрязнения;

2) район порта Пионерский и сброса очистных вод системы «Объединенные канализационно-водопроводные очистные сооружения» (ОКОС) – до сверхвысокой степени загрязнения;

3) район г. Зеленоградска – до высокой степени загрязнения.

3. *Геохимическая аномалия вблизи объектов инфраструктуры морской нефтедобычи (нефтедобывающая платформа и подводный трубопровод).*

По результатам масштабной съемки 2017-2018 гг. были получены данные о химическом составе донных осадков со всего российского сектора юго-восточной части Балтийского моря. Абсолютные содержания Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As в илах Гданьской впадины закономерно были на порядок выше, чем в обломочных отложениях. Для сравнения уровня загрязнения донных осадков с различным

содержанием тонкодисперсной фракции была выполнена нормализация ТМ по Fe (Uscinowicz et al., 2011), что позволило впервые для района исследований оценить уровень загрязнения различных типов донных осадков и вклад отдельных потенциальных источников загрязнения.

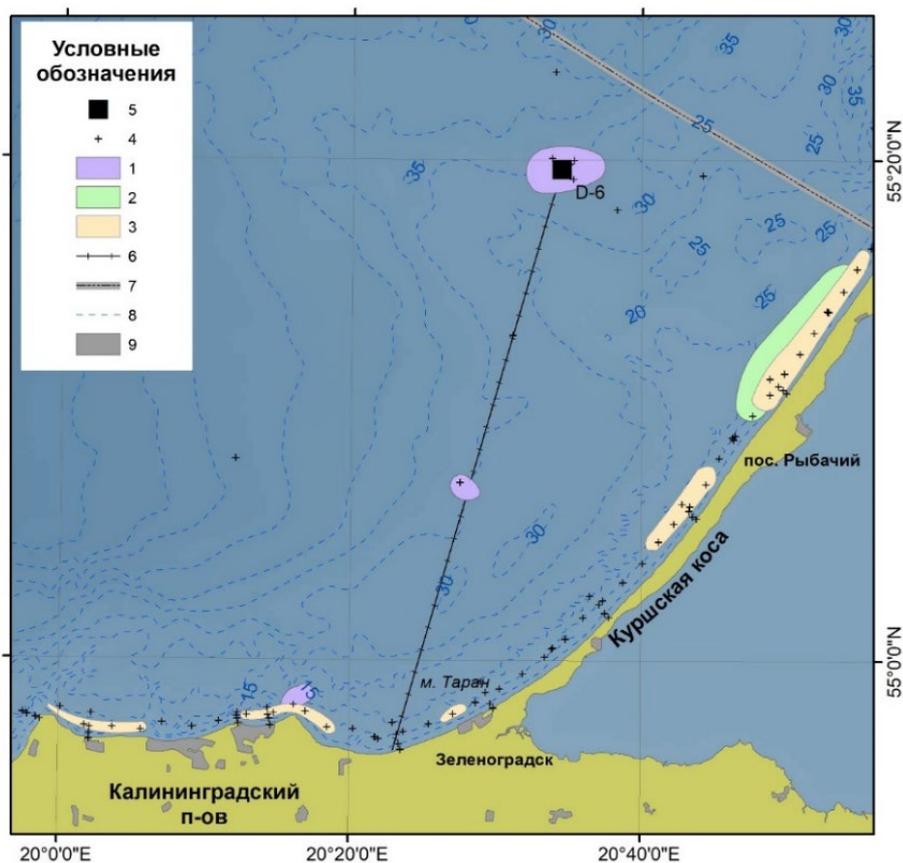


Рисунок 1 – Схема геохимических аномалий на северном побережье Калининградской области. Условные обозначения: 1 – аномалии, обнаруженные в 2017 г., 2 – аномалия, существовавшая в 2013-2014 гг., 3 – аномалии, обнаруженные в 2014 г., 4 – точки отбора проб, 5 – МЛСП D6, 6 – трубопровод, 7 – ИЭЗ РФ, 8 – изобаты, м, 9 – населенные пункты

После нормализации к Fe установлено, что обломочные отложения были значительно более загрязненными за счет высоких значений, полученных на отдельных станциях, что отражается в высоком стандартном отклонении в выборке. Точечные источники поступления ТМ, в зоне воздействия которых были отобраны образцы, значительно выделялись на общем фоне. Однако усредненные

значения выборки были сопоставимы для илистых и обломочных осадков. Так, нормализованные значения Cu, Ni, Cr, Cd и Pb в обломочных осадках превышали значения в илах в 1,7-2 раза, а значения Zn были примерно на одном уровне. Расчет экологических индексов (CF и mCd) позволил оценить влияние на донные осадки отдельных потенциальных источников загрязнения. Более высокие значения экологических индексов, характерные для обломочных отложений, обусловлены более интенсивным использованием мелководной части акватории.

При интегральной оценке уровня загрязнения (mCd) умеренным уровнем загрязнения по (Abraham, 2005; Abraham, Parker, 2008) характеризуются МЛСП D-6, подводный нефтепровод и выпуск системы ОКОС. Отдельные признаки загрязнения (умеренный коэффициент по Nakanson, 1980) Zn, Ni, Co, Cr и As отмечены на подводном береговом склоне Куршской косы, где значительная геохимическая аномалия была отмечена в 2013-2014 гг. (см. рис. 1).

## **2. Геохимическая аномалия Pb, Cu, Ni, Zn в осадках плато Рыбачий обусловлена вдольбереговым переносом от Калининградского полуострова на северо-восток вдоль Куршской косы.**

На Куршской косе значимые источники загрязнения ТМ не известны. Калининградский полуостров, напротив, более населен и используется в различных целях, поэтому может рассматриваться в качестве зоны поступления ПОВ. На подводном береговом склоне северной части Калининградского полуострова выявлены геохимические аномалии, приуроченные к участкам, испытывающим крайне интенсивную нагрузку. Здесь, на абразионном побережье и подводном береговом склоне у мыса Таран берет начало и распространяется на восток вдольбереговой поток взвешенных наносов (Зенкович, 1962). Происхождение аномалии у Куршской косы связано с переносом загрязнения совместно с песчаными наносами. Увеличение тонкодисперсной фракции в донных осадках в срединной части Куршской косы свидетельствует об ослаблении такого потока.

Существующие оценки направления вдольберегового потока наносов (Зенкович, 1962) основаны, как правило, на расчетах характеристик активных гидродинамических факторов с учетом морфологии береговой зоны (Кнапс, 1952;

Бойнагрян, 1966 а,б; Шуйский, 1969; Шуйский и др., 1970; Кирлис, 1971; Рябкова, 1987; Богданов и др., 1989; Леонтьев и др., 1989; Viska, Soomere 2012; Soomere, Viska 2013; Леонтьев, 2015; Krek et al., 2016). В большинстве случаев такие расчеты выполняются на основе метеорологических данных или смоделированных полей ветра за различные временные отрезки (периоды), что приводит к существенному расхождению результатов, но все они показывают итоговое направление переноса от Калининградского полуострова к центральной части Куршской косы. В многолетней перспективе выделение зон конвергенции в указанных работах происходит намного севернее обнаруженной геохимической аномалии и, как правило, эти зоны расположены около пос. Нида. Все эти подходы отражают среднюю многолетнюю тенденцию и не рассматривают конкретные случаи штормовой активности.

Подход, основанный на гранулометрических распределениях в песчаных отложениях (MacLaren, Bowles, 1985), как правило, позволяет выявить только последнее значимое направление перемещения осадочного материала и не может свидетельствовать о генеральном направлении такого транспорта (Kovaleva et al., 2016; Krek et al., 2016). По гранулометрическим характеристикам было установлено, что последний перед съемкой перенос наносов был направлен от корня Куршской косы вдоль ее берега в северо-восточном направлении. Направление такого переноса указывает на привнесение загрязнения от северного побережья Калининградского полуострова.

Достоверным индикатором генерального направления транспорта наносов являются природные минералы-трассеры (в данном случае глауконит), поступающие из локализованных выходов коренных пород Калининградского полуострова. Распределение глауконита в поверхностном слое осадков маркирует генеральное направление и интенсивность переноса взвешенных наносов, и, следовательно, определяет границу функционирования прибрежных литодинамических систем.

Максимальное содержание глауконита в отложениях северного побережья было обнаружено в Филинской бухте, где на подводный береговой склон выклиниваются палеогеновые отложения «голубой земли» – источника глауконита (рис. 2). Также высокие содержания были получены в бухтах,

примыкающих к наиболее крупному мысу северного побережья – Гвардейскому. Здесь происходит частичная разгрузка вдольберегового потока. Увеличение содержания глауконита в бухте, примыкающей с запада к мысу Гвардейский, обусловлено отклонением вдольберегового потока от берега. Этому процессу способствует конфигурация бухтового берега и портовых сооружений г. Пионерский. Направленность северного мола создает дефицит наносов на пляжах срединной части бухты, где развиваются интенсивные абразионные процессы. Напротив, мористее 5 м изобаты развивается крупная подводная песчаная форма. Специфическая ситуация складывается в районе пос. Лесной, где возникает аномалия содержания глауконита на глубине 10 м. Возможно, это обусловлено выносом песчаного материала на глубину в результате возникновения локальной зоны конвергенции двух встречных потоков наносов (Krek et al., 2016). Далее в сторону литовской границы вновь преобладает вдольбереговая составляющая, вплоть до истощения потока.

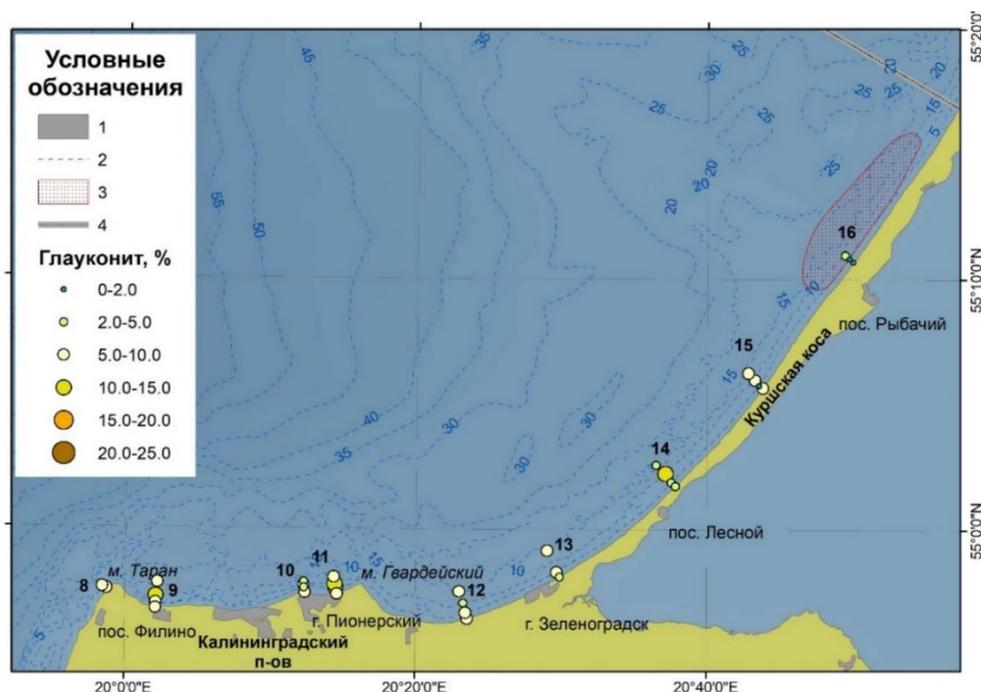


Рисунок 2 – Процентное содержание глауконита в донных осадках на северном побережье Калининградской области. Условные обозначения: 1 – населенные пункты; 2 – изобаты, м; 3 – аномалия ТМ; 4 – граница с Литвой. Цифрами обозначены номера профилей

В прибрежной зоне 16 профиля (см. рис. 2) заметно изменяется минералогический состав и на первое место выходят рудные черные минералы (40,8%), кварц 28%, циркон (9%), гранат (7,5%) и появляется сфен (1,1%). Для косы характерно увеличение содержания тяжелой подфракции до 22% (при среднем для побережья 10%). Для побережья Куршской косы в предыдущих исследованиях (Бойнагрян, 1966 а) были выявлены участки образования россыпей тяжелых минералов, как результат длительной волновой переработки наносов в местах аккумуляции.

Отсутствие значимых изменений формы, обломков и идентичная окатанность зерен глауконита вдоль северного побережья вероятно объясняется схожим временем нахождения зерен в соответствующей гидродинамической обстановке. Миграция зерен вдоль берега может быть разнонаправленной и многофазной, а наличие в удаленных участках глауконита свидетельствует о генеральном направлении перемещения наносов. Увеличение содержания зерен глауконита с глубиной свидетельствует о зонах развития условий для оттока материала на глубину.

Минералогический анализ подтвердил ослабление вдольберегового потока на Куршской косе около пос. Рыбачий, что согласуется с результатами, полученными другими методами и предположением о появлении геохимической аномалии благодаря вдольбереговому переносу загрязнения. Транспорт загрязнения совместно с вдольбереговым потоком наносов и зонами его разгрузки является ключевым фактором в загрязнении Куршской косы.

По результатам химического анализа вскрышных пород установлено, что общее в годовом выражении поступление ТМ в береговую зону с твердым стоком из выпуска на пляж составляет: Со – 6 т, Ni – 24 т, Cu – 12 т, Zn – 49 т, Pb – 15,5 т, As – 5,8, Hg – 0,04 и Cd – 0,3 т. В результате такой деятельности было ожидаемо обнаружение геохимической аномалии в районе сброса пульпы.

Наибольшее количество осадочного материала мобилизуется при абразии берегового уступа и подводного берегового склона. Учитывая современные темпы абразии песчаных берегов на западном побережье, было оценено количество поступающего загрязнения с естественными процессами. Количество твердого материала, поступающего с 1 км абрадируемого коренного побережья,

оценивается в 75000 м<sup>3</sup> (Атлас, 2010; Krek et al., 2018). Длина участка отмершего клифа превышает 20 км. Количество поступающих загрязнителей можно оценить как: Co – 0,5 т, Ni – 0,9 т, Cu – 0,7 т, Pb – 0,7 т, Zn – 4 т, что в общих чертах является сопоставимым с поступлением при сбросах. Материал, поступающий при сбросе пульпы, распространяется на север до мыса Бакалинский и на юг вплоть до г. Балтийска.

Содержание тяжелых металлов в донных осадках определялось следующей последовательностью (мг/кг): Zn (8,2) > Pb (4,2) > Ni (2,2) > As (1,6) > Cu (1,45) > Co (1,4) > Cd (<0,1) > Hg (<0,005).

Расчет индекса CF для донных отложений показал низкий коэффициент загрязнения, что обусловлено сбросом антропогенно не загрязненного материала. Сброс пульпы приводит к тому, что природная составляющая за счет объемов сброса значительно перекрывает антропогенную нагрузку, образующуюся при применении технологии размыва. Таким образом, ожидаемой геохимической аномалии на западном побережье выявлено не было.

#### **4. В голоценовых илах Гданьской впадины проявляются природные геохимические аномалии Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb, обусловленные разгрузкой подземных вод оксфорд-титонского горизонта.**

В зонах разломов фиксируются повышенные содержания элементов-маркеров разгрузки подземных вод (K, Na, Ca, Mg), что является признаком субмаринной разгрузки подземных вод. Повышенное содержание элементов-маркеров в донных осадках и морфологические признаки выходов флюидов (покмарки) из осадочной толщи определяют зону разломов как перспективную для выявления природной геохимической аномалии эндогенного происхождения.

На участке 1 согласно карте дочетвертичных отложений (Атлас, 2010) подземные воды представлены юрскими водоносными горизонтами (рис. 3). Оксфорд-титонский водоносный горизонт приурочен к верхней части разреза. Воды соленые, относятся к хлоридному натриевому типу, их минерализация изменяется в пределах от 12 до 17 г/дм<sup>3</sup> (Гидрогеология СССР, 1970; Государственная геологическая карта, 1983). Повышенные содержания Ca и Na в донных осадках и высокие концентрации ионов Ca<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup> в придонной воде

свидетельствуют о привнесении этих элементов в осадочный чехол совместно с разгрузкой подземных вод.

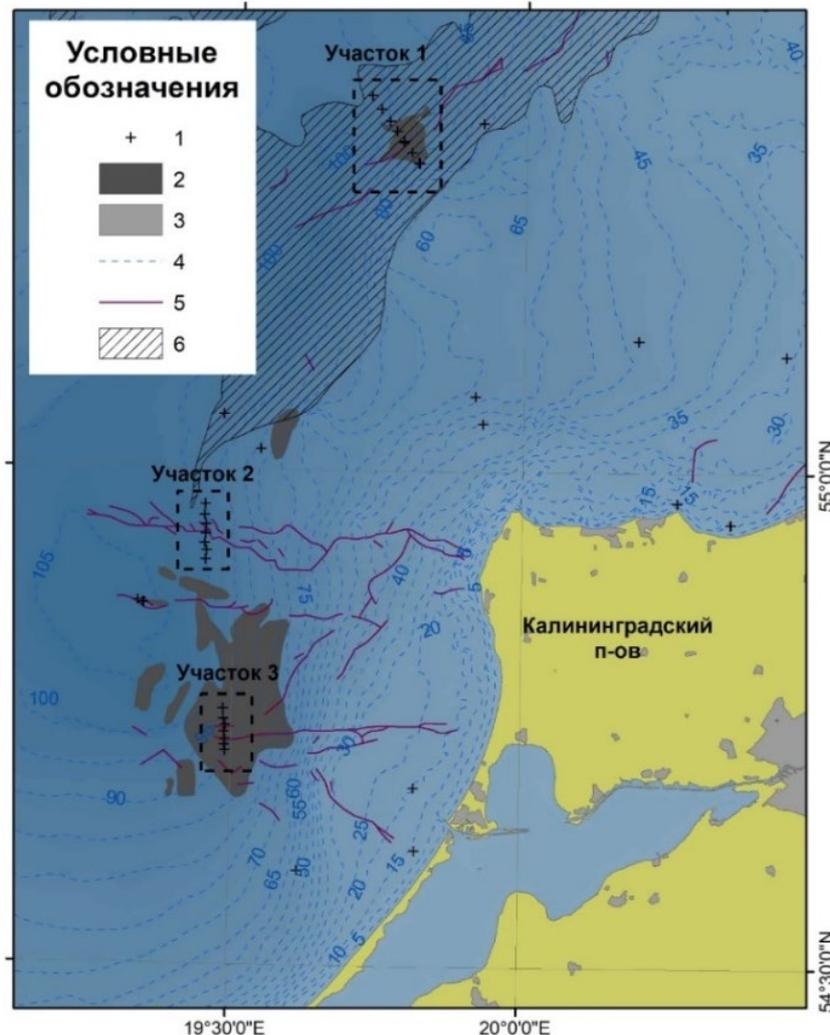


Рисунок 3 – Положение участков исследований.

Условные обозначения: 1 – точки пробоотбора, 2 – ареалы распространения газонасыщенных осадков, 3 – населенные пункты, 4 – изобаты, м, 5 – тектонические разломы, 6 – район возможного выхода на поверхность дна подземных вод оксфорд-титонского горизонта

По результатам химического анализа в колонках (0-60 см) донных осадков установлено, что содержание основных макроэлементов (K, Na, Ca, Mg) на участке 1 было выше, чем на фоновых участках 2 и 3: K на 20%, Na на 23% Ca и Mg на 46 %. При этом содержание Fe (нормирующий элемент, по Uścińowicz et

al., 2011) было сходным и в среднем отличалось на 2%, что лежит в пределах погрешности метода определения. Cu, Zn, Cd, Pb, Cr наоборот, в зоне разломов показали отрицательную динамику, что возможно связано с поступлением недонасыщенных этими элементами подземных вод. Co, Ni и As были на сопоставимом уровне и, по-видимому, соответствуют природным значениям для региона.

**5. Региональная шкала загрязнения донных осадков, включающая пять классов загрязнения тяжелыми металлами, позволяет наиболее достоверно оценивать последствия хозяйственной деятельности и учитывать геоэкологические риски.**

Собранный в ходе исследования объем данных позволяет не только определить значения природного фона и выделить антропогенный вклад как отдельных источников, так и антропогенный след в целом, но и позволяет адаптировать шкалу загрязнения донных осадков к региональным особенностям. Географически наиболее близка к району исследований шведская шкала (WGMS, 2003), которая основывается на абсолютных содержаниях ТМ в кернах незагрязненных донных осадков (доиндустриальный период). Однако, эта шкала не учитывает сорбционную способность частиц и при ее использовании невозможно дифференцировать загрязнение в различных типах донных осадков. Поэтому в процессе адаптации шкалы были использованы значения, нормализованные по Fe. Для этого было проанализировано 327 проб донных осадков различных типов.

В шведской шкале (WGMS, 2003) граница первого класса загрязнения соответствует содержанию ТМ в природе, т.е. при адаптации, аналогично, первый класс загрязнения не превышает природного фона и соответствует средним доиндустриальным значениям, полученным в колонках донных осадков с горизонтов ниже 21 см.

В условиях природопользования за последние десятилетия сложился природно-антропогенный фон, содержание ТМ, в котором значительно превышает природные значения. Второй класс загрязнения донных осадков соответствует региональному природно-антропогенному фону для

поверхностных осадков, которые не испытывают воздействия точечных источников. Для характеристики класса были приняты значения, характерные для поверхностных илистых осадков Гданьской впадины. Третий класс загрязнения предполагает влияние точечных источников загрязнения, что отражено в составе обломочных отложений района исследования. К четвертому классу загрязнения отнесены уровни конкретного загрязнения ТМ, поэтому его нижней границей являются средние значения для фона обломочных осадков, а верхней – достаточно условный уровень максимального отмеченного загрязнения. Пятый класс выделен для условий определения катастрофического загрязнения и соответствует более высоким значениям, чем были отмечены в предыдущих исследованиях (табл. 1).

Таблица 1 – Региональная шкала загрязнения донных осадков, основанная на усредненных содержаниях ТМ, нормализованных по содержанию Fe

Класс	Cu/Fe	Zn/Fe	Co/Fe	Ni/Fe	Cr/Fe	Cd/Fe	Pb/Fe	As/Fe
1	< 9	< 20	< 3	< 10	< 23	< 0,1	< 6	< 5
2	9-14	20-32	3-5	10-15	23-30	0,1-0,2	6-16	5-7
3	14-20	32-40	5-14	15-21	30-41	0,2-0,4	16-31	7-48
4	20-92	40-100	14-62	21-110	41-137	0,4-1,7	31-93	48-180
5	>92	>100	>62	>110	>137	>1,7	>93	>180

### Основные выводы

1. Существенные различия содержания ТМ для суббассейнов Балтийского моря, обусловлены как природными, так и антропогенными процессами. Для оценки качества и прогнозирования изменений окружающей среды в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки на акваторию особое значение имеет региональный подход, способный отразить местные природные особенности. Разработка региональных критериев степени загрязнения донных осадков необходима для планирования хозяйственной деятельности и минимизации ущерба морской экосистемы. Критерии для конкретного бассейна, имеющего общие черты развития природно-антропогенного геохимического фона,

позволяют отслеживать и оперативно реагировать на изменения окружающей среды.

2. По результатам анализа материалов экспедиционных исследований 2011-2020 гг. были уточнены фоновые содержания ТМ для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря. Для обломочных осадков среднее содержание Cu находится в диапазоне 4,5-9,2 мг/кг, Cr – 6,8-23 мг/кг, Cd – 0,2-0,6 мг/кг, Pb – 2,7-12 мг/кг, Hg – 0,006-0,009 мг/кг, Zn – около 19 мг/кг, Co – около 5 мг/кг, Ni – около 8 мг/кг, As – около 18 мг/кг. Для илистых осадков значения содержания ТМ были значительно выше, в связи с преобладанием тонкодисперсной фракции. Так, среднее содержание Cu находилось в диапазоне 28,5-44,0 мг/кг, Cr – 55-91 мг/кг, Cd – 0,60-0,99 мг/кг, Pb – 16,6-66,0 мг/кг, Hg – 0,069-0,177 мг/кг, Zn – около 134 мг/кг, Co – около 8 мг/кг, Ni – около 39 мг/кг, As – около 29 мг/кг. Значительный разброс значений обусловлен особенностями гранулометрического состава, сроках отбора проб и методами анализа. Тем не менее, полученные значения могут быть приняты в качестве ориентировочных.

3. Нормализация содержания ТМ к Fe выявила повышенное загрязнение именно обломочных донных осадков, что обусловлено более высокой степенью антропогенной нагрузки в мелководной части акватории. По результатам исследования выявлены следующие геохимические аномалии:

- аномалия Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As около нефтедобывающей платформы и подводного нефтепровода, обусловленная хозяйственной деятельностью при нефтедобыче;

- аномалия Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As около мыса Гвардейский, образованная под воздействием сброса сточных вод системы очистных сооружений;

- аномалия Hg, Pb, Cu, Ni и Zn около Куршской косы, обусловленная вдольбереговым переносом от северного побережья Калининградского полуострова и аномалии на мысе Гвардейский;

- аномалия в илах Гданьской впадины эндогенного генезиса, обусловленная вымыванием Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb при разгрузке подземных вод.

Сброс пульпы Янтарного комбината в береговую зону не привел к формированию геохимической аномалии, так как вскрышные породы близки по составу к природному фону.

4. Генезис геохимической аномалии у Куршской косы связан с вдольбереговым переносом загрязнения от северного побережья Калининградского полуострова, было подтверждено гидрометеорологическим, гранулометрическим и минералогическим методами оценки вдольберегового потока наносов. По распределению глауконита в поверхностных донных осадках подводного берегового склона показано, что вдольбереговой поток наносов ослабевает около пос. Рыбачий.

5. По соотношениям ТМ и природных элементов разработана региональная шкала степени загрязнения донных осадков. За классы шкалы приняты значения, характерные для определенного типа осадков. Так, содержания ТМ в доиндустриальный период, полученные из колонок донных осадков, свидетельствуют об отсутствии какого-либо загрязнения и отнесены к первому классу. Содержания ТМ, характерные для поверхностных илов Гданьской впадины, удаленных от потенциальных источников загрязнения, соответствуют второму классу загрязнения и отражают естественный природно-антропогенный фон в Гданьском бассейне. Содержания ТМ в обломочных осадках прибрежного мелководья отражают воздействие отдельных антропогенных источников и относятся к третьему классу. Четвертый класс соответствует значениям достоверно выявленного загрязнения, что соответствует максимальным значениям для периода исследований. Пятый класс выделен условно для интерпретации аварийных выбросов загрязнения и принят выше максимальных обнаруженных значений. Такая шкала и ее интерпретация позволяют оценить степень загрязнения любого типа осадков.

**Публикации по теме исследования в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Крек А.В., Ульянова М.О., Бубнова Е.С., Кречик В.А., Рябчук Д.В., Данченков А.Р., Чурин Д.А., Капустина М.В., Ткачева Е.С., Хатмуллина Л.И., Сергеев А.Ю. Геоэкологические условия в Балтийском море в 2017 г. // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 1. С. 184–186.

2. Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data // *Regional Studies in Marine Science*. 2016. Vol. 7. P. 81-87.

3. Krek A., Krechik V., Danchenkov A., Krek E. Pollution of the sediments of the coastal zone of the Sambia Peninsula and the Curonian Spit (Southeastern Baltic Sea) // *PeerJ*. 2018. 6:e4770.

4. Krek A., Ulyanova M., Koschavets S. Influence of land-based Kaliningrad (Primorsky) amber mining on coastal zone // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 131. P. 1-9.

5. Krek A., Danchenkov A., Ulyanova M., Ryabchuk D. Heavy metals contamination of the sediments of the southeastern Baltic Sea: the impact of economic development // *Baltica*. 2019. Vol. 32 (1). P. 51–62.

6. Krek A., Ulyanova M. Mineral tracers of the alongshore sediment transport (example from the South-Eastern Baltic Sea) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. 20. ES6003.

7. Krek A., Krechik V., Danchenkov A., Mikhnevich G. The role of fluids in the chemical composition of the upper Holocene sediment layer in the Russian sector of the South-East Baltic // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20. № 6. ES6006.

**Содержание диссертации:**

Введение	4
Глава 1 Изученность геохимического состава донных осадков	12
1.1 Физико-географическая характеристика района исследования	12
1.2 Потенциальные источники загрязнения и хозяйственное использование акватории	18
1.3 Мировая практика оценки и нормативы качества донных осадков	23
1.4 Роль металлов в донных осадках Балтийского моря	32
Глава 2 Материалы и методы	44
2.1 Отбор проб	47
2.2 Аналитические (лабораторные) методы	54
2.3 Статистические методы	57
Глава 3 Геохимические аномалии в юго-восточной части Балтийского моря	64

3.1 Фоновое содержание тяжелых металлов в донных осадках (природно-антропогенный фон акватории)	64
3.2 Геохимическая аномалия в прибрежной зоне (Полигон 1)	74
3.3 Локальные геохимические аномалии в открытой части акватории района исследований (Полигон 2)	84
3.4 Роль сброса вскрышных пород карьера в геохимический фон прибрежной зоны западного побережья Калининградской области (Полигон 3)	95
Глава 4 Происхождение геохимических аномалий	104
4.1 Роль вдольберегового переноса в образовании аномалий на подводном береговом склоне Балтийской и Куршской кос	104
4.2 Образование геохимической аномалии в илах Гданьской впадины	115
Глава 5 Региональная шкала оценки загрязнения донных осадков	120
Заключение	124
Литература	127
Приложение 1 – Содержание тяжелых металлов в поверхностных донных осадках в российского сектора за период 2013-2020 гг.	152
Приложение 2 – Содержание Cu, Cr, Cd, Pb и Hg в поверхностных донных осадках на нефтегазоносных структурах	155
Приложение 3 – Содержание тяжелых металлов в прибрежной зоне Калининградского полуострова и Куршской косы (2014 г.)	157
Приложение 4 – Гранулометрический состав донных отложений в прибрежной зоне Калининградского полуострова и Куршской косы (2014 г.)	159
Приложение 5 – Результаты расчетов экологических индексов для осадков прибрежной зоны Калининградского полуострова и Куршской косы (2014 г.)	163
Приложение 6 – Содержание тяжелых металлов в донных осадках прибрежной зоны Калининградской области (2017 г.)	165
Приложение 7 – Результаты нормализации тяжелых металлов в прибрежной зоне Калининградской области (2017 г.)	168
Приложение 8 – Экологические индексы загрязнения донных осадков тяжелыми металлами в прибрежной зоне Калининградской области (2017 г.)	171
Приложение 9 – Результаты нормализации содержания Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb и As к Fe для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря	174
Приложение 10 – Экологические индексы загрязнения донных осадков тяжелыми металлами для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря	177

**Крек Александр Владимирович**

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ  
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

Подписано в печать 18.04.2022 г.  
Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,5  
Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано Полиграфическим центром  
Балтийского федерального университета им. И. Канта  
236022, г. Калининград, Гайдара, 6