

Санкт-Петербургский государственный университет

Вилкус Оксана Игоревна

Выпускная квалификационная работа

*Оценка эколого-геохимического состояния донных осадков южной части
Восточно-Сибирского моря*

Направление *05.03.06 «Экология и природопользование»*

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

Профиль *«Экология и недропользование»*

Научный руководитель:

Ст. преп. каф. экологической геологии

к.г.-м.н., доц. А.М. Беляев

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

Оглавление

Введение.....	3
1. Характеристика района исследования	4
1.1. Физико-географический очерк.....	4
1.2. Геологическое строение	10
1.3. Характеристика поверхностных донных отложений и процессов седиментации.....	15
1.4. Характеристика месторождений Восточно-Сибирского моря.....	18
2. Методы и материалы	24
2.1. Методика полевых исследований и отбора проб	24
2.2. Методика лабораторных исследований.....	29
2.2.1. Гранулометрический анализ	29
2.2.2. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS).....	31
2.2.3. Рентгенофазовый анализ	32
2.3. Виды нормирования содержания загрязняющих веществ в донных осадках	34
3. Результаты исследования	38
3.1. Представление результатов и математико-статистическая обработка	38
3.2. Распределение тяжелых металлов в донных осадках южной части Восточно-Сибирского моря.....	41
Заключение	48
Приложение №1	50
Приложение №2	51
Приложение №3	52
Список литературы	53

Введение

Моря Арктики – одни из наиболее слабо изученных территорий мира. Имеющиеся у человечества знания о функционировании экосистем Северного-Ледовитого океана, о его геологическом строении, тектонических условиях порождают еще большее количество вопросов. Сложность и медленное продвижение в изучении арктических морей обусловлены их суровыми климатическими условиями, несомненно ограничивающими возможность применения большего спектра методов исследования.

Активное освоение арктических территорий, вызванное их огромным ресурсным потенциалом, началось в последние 90 лет, хотя первые полярные экспедиции были организованы еще в начале XVII века. За это время территории северных морей были подвергнуты колоссальному влиянию человека, в том числе и отрицательному. Чтобы сократить неблагоприятное влияние деятельности человека на территории северных морей необходимо проводить детальное изучение эколого-геологической обстановки, оценивать влияние освоения шельфа на природные экосистемы, а также осуществлять мониторинг природных сред, на которые оказывается влияние в ходе человеческой деятельности.

Целью работы является оценка эколого-геохимического состояния донных осадков в южной части Восточно-Сибирского моря для осуществления геоэкологического мониторинга будущей горно-геологической деятельности в акватории и на континенте.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучение физико-географических и геологических условий Восточно-Сибирского моря;
2. Определение гранулометрического состава отобранных проб донных отложений;
3. Проведение ряда анализов для определения химического состава проб донных осадков и содержания в них загрязняющих веществ;
4. Математико-статистическая обработка полученных данных;
5. Создание карт распределения загрязняющих веществ в донных осадках южной части Восточно-Сибирского моря и оценка экологического состояния изучаемого участка.

Проводимые исследования позволят расширить банк геологических и геохимических данных о донных отложениях Восточно-Сибирского моря. Учитывая достаточно низкую степень геологической изученности региона, они представляют научный и практический интерес.

1. Характеристика района исследования

1.1. Физико-географический очерк

Восточно-Сибирское море — одно из материковых окраинных морей Северного Ледовитого океана. В рамках принятых границ площадь поверхности моря составляет 944 600 км², а объем вод – 60 700 км³. В среднем Восточно-Сибирское море имеет глубину до 66 метров, в центральной и западной части глубины - всего 20-30 метров, что обусловлено его расположением почти полностью в пределах материковой отмели. Наибольшая глубина составляет примерно 915 метров – на границе моря в пределах Чукотской абиссальной равнины.

Границы моря во многом проводятся по условным линиям, но существует ряд естественных рубежей, отделяющих Восточно-Сибирское море от Северного Ледовитого океана и его иных морей:

- Западная граница проходит от точки пересечения меридиана северной оконечности о. Котельный с краем материковой отмели (79° с. ш., 139° в. д.) до северной оконечности этого острова (м. Анисий), затем по его западному берегу и далее следует вдоль восточной границы моря Лаптевых;
- Северная граница совпадает с краем материковой отмели от точки с координатами 79° с. ш., 139° в. д. до точки с координатами 76° с. ш., 180° в. д.;
- Восточная граница проходит от точки с координатами 76° с. ш., 180° в. д. по меридиану 180° до о. Врангеля, затем по его северо-западному берегу до м. Блоссом и далее до м. Якан на материке;
- Южная граница проходит по побережью материка от м. Якан до м. Святой Нос (западная граница пролива Дмитрия Лаптева и Санникова).

В водах Восточно-Сибирского моря расположено очень мало островов, наиболее крупные из которых находятся в его западной части в составе группы Новосибирских островов (38400 км²): Анжу (29400 км²), Ляховские (6100 км²), Де-Лонга (228 км²). В южной части у побережья находится более мелкая группа Медвежьих островов (60 км²). В центральной части моря островов нет.

Береговая линия Восточно-Сибирского моря образует крупные изгибы, местами уходящие глубоко в сушу, местами выступающие в море, между которыми есть участки с ровной линией берега. (Ray, Bacon, 1982) Термоабразионные участки там чередуются с аккумулятивными, сильно изрезанными песчаными косами и островками и находящимися вблизи устьев примыкающих рек. По характеру ландшафтов западная часть побережья

Восточно-Сибирского моря резко отличается от восточной. На участке от Новосибирских островов и до устья Колымы, где к морю подходит заболоченная тундра, берега однообразно низменны и пологи. Восточнее Колымского залива побережье становится гористым, кончается и его унылое однообразие. От устья Колымы до о. Айон прямо к воде подходят невысокие холмы, местами круто обрывающиеся. Чаунская губа – крупнейший залив в пределах Восточно-Сибирского моря - обрамлена невысокими, но крутыми ровными берегами. В восточной части побережья моря к берегу выходят отроги Чукотского нагорья, местами встречаются скалистые обрывы. Скалистые обрывы до 400 м высотой имеются и на западном побережье о. Врангеля.

Подводный рельеф шельфа, образующего ложе этого моря, в общих чертах представляет собой равнину, наклоненную с юго-запада на северо-восток. Дно моря не имеет значительных впадин и возвышенностей. Преобладают глубины до 20—25 м. К северо-востоку от устьев Индигирки и Колымы на морском дне отмечены относительно глубокие желоба. Предполагают, что это следы древних речных долин, ныне залитых морем. Область малых глубин в западной части моря образует Новосибирскую отмель. Наибольшие глубины сосредоточены в северо-восточной части моря, но, как говорилось выше, они почти нигде не превышают 100 м. *(Добровольский, Залогин, 1982.)*

Поскольку Восточно-Сибирское море находится в зоне соприкосновения атмосферного воздействия Атлантического и Тихого океанов (в западную часть моря изредка проникают циклоны атлантического происхождения, а в его восточные районы – тихоокеанского), его климат можно охарактеризовать как полярный морской с незначительным влиянием континента. Сравнительно холодное лето во всем море, бурная погода в конце лета и особенно осенью в окраинных районах моря и затишье в его центральной части — характерные климатические черты Восточно-Сибирского моря. *(Добровольский, Залогин, 1982.)*

Зимой главное воздействие на море оказывает отрог Сибирского максимума, выходящий к его побережью, тогда как гребень Полярного антициклона выражен слабее. В связи с этим над морем преобладают юго-западные и южные ветры со скоростью 6—7 м/с. Они приносят с собой холодный воздух с континента, поэтому среднемесячная температура воздуха в январе держится около —28—30°. Для зимы характерна спокойная ясная погода, которую иногда нарушают циклонические вторжения. Атлантические циклоны на западе моря приносят усиление ветра и некоторое потепление, а имеющие в тылу холодный континентальный воздух тихоокеанские циклоны только увеличивают скорость ветра, облачность и вызывают метели в юго-восточной части моря. На гористых

участках побережья с прохождением тихоокеанских циклонов связано образование местного ветра — фена. Обычно он достигает здесь штормовой силы, принося с собой некоторое повышение температуры и уменьшение влажности воздуха. (Мазарович, 2005)

Летом давление над материком Азии понижено, а над морем повышено, поэтому преобладают ветры северных румбов. В начале сезона они очень слабые, но в течение лета скорость ветра постепенно возрастает, достигая в среднем 6—7 м/с. К концу лета западная часть Восточно-Сибирского моря становится одним из наиболее оживленных участков трассы Северного морского пути. Нередко ветер дует со скоростью 10—15 м/с. (Serreze, Roger, 2014)

Юго-восточная часть моря летом значительно спокойнее. Усиление ветра здесь обусловлено влиянием фена. Устойчивые северные и северо-восточные ветры обуславливают низкую температуру воздуха. Средняя июльская температура всего +1° на севере моря и до +3° в прибрежных районах. Понижение температуры с юга на север объясняется охлаждающим влиянием льдов и согревающим воздействием материка. В летнее время над Восточно-Сибирским морем стоит преимущественно пасмурная погода с мелким морозящим дождем, иногда идет мокрый снег. (Добровольский, Залогин, 1982.)

Главные черты гидрологических условий Восточно-сибирского моря можно выделить на основании свободного сообщения с Центральным Арктическим бассейном, большой степени ледовитости, а также малого речного стока.

В отличие от Карского и моря Лаптевых материковый сток в Восточно-Сибирское море сравнительно невелик. Он составляет около 250 км³/год, т. е. всего 10% от общего объема речного стока во все арктические моря. Самая крупная из впадающих в него рек (Колыма) за год дает 132 км³ воды, вторая по величине река (Индиگیرка) сбрасывает 59 км³ воды в год. Все остальные реки за это же время вливают в море примерно 35 км³ воды. Вся речная вода поступает в южную часть моря, причем примерно 90% стока приходится, как и в других арктических морях, на летние месяцы. Небольшая мощность потоков не позволяет речной воде распространяться далеко от устьев даже во время максимального стока. В связи с этим при столь обширных размерах Восточно-Сибирского моря береговой сток существенно не влияет на его общий гидрологический режим, а лишь обуславливает некоторые гидрологические особенности прибрежных участков в летнее время.

Температура воды на поверхности во все сезоны в общем понижается с юга на север. Зимой она близка к точке замерзания и вблизи устьев рек равна -0,2—0,6°, а у северных границ моря -1,7—1,8°. Летом распределение поверхностной температуры обусловлено ледовой обстановкой. Температура воды в заливах и бухтах достигает +7—8°, а в открытых

свободных ото льда районах только $+2—3^{\circ}$, а у кромки льда она близка к 0° . (Мазарович, 2005)

Изменение температуры воды с глубиной зимой и весной почти не заметно, лишь вблизи устьев крупных рек она понижается от $-0,5^{\circ}$ в подледных горизонтах до $-1,5^{\circ}$ у дна. Летом на свободных ото льдов пространствах температура воды несколько понижается от поверхности до дна в прибрежной зоне на западе моря. В его восточной части резкое понижение значений температуры воды от поверхностных начинается с $6—7$ м, а в зонах влияния берегового — с 10 м, а далее, через $7-10$ м, продолжает плавно понижаться до дна. Мелководное слабо прогреваемое Восточно-Сибирское море — одно из самых холодных арктических морей Северного Ледовитого Океана.

Соленость на поверхности в общем увеличивается от юго-запада к северо-востоку. Зимой и весной она равна $4—5\%$ вблизи устьев Колымы и Индигирки, достигает величин $24—26\%$ у островов Медвежьих, увеличивается до $28—30\%$ в центральных районах моря и повышается до $31—32\%$ на его северных окраинах. Летом в результате притока речных вод и таяния льдов величины поверхностной солености уменьшаются до $18—22\%$ в прибрежной зоне, $20—22\%$ у островов Медвежьих, $24—26\%$ на севере у кромки тающих льдов. (Добровольский, Залогин, 1982.)

Зимой лишь в северо-западном районе, куда проникают океанские воды с севера, соленость увеличивается от 23% в верхнем слое толщиной $10—15$ м до 30% у дна. С конца весны и в течение лета на свободных ото льда пространствах в мелководных районах (до глубин $20—25$ м) распределение охватывает всю толщу вод. В более глубоких районах на севере и востоке моря на горизонтах $5—10$ м, местами до 15 метров соленость резко увеличивается, а далее плавно и немного повышается до дна. Горизонтальное и вертикальное распределение солености в море во многом определяется ледовой обстановкой и материковым стоком. (Neatby, Leslie, 1973)

Вследствие мелководности и отсутствия глубоких желобов, выходящих за северные пределы Восточно-Сибирского моря, подавляющую часть его пространств от поверхности до дна занимают поверхностные арктические воды с соответствующими характеристиками. В сравнительно ограниченных приустьевых районах распространены воды с повышенной температурой и низкой соленостью, образованные в результате смешения речных и морских вод.

Постоянные течения на поверхности Восточно-Сибирского моря образуют слабо выраженную циклоническую циркуляцию. Вдоль материкового побережья выражен устойчивый перенос вод с запада на восток. У м. Биллингса часть из них направляется на

север и северо-запад, выносятся к северным окраинам моря, где включается в поток, идущий к западу. При разных синоптических ситуациях изменяется и движение вод. В одних случаях, преобладают выносные, а в других — нажимные течения, например, в районе пролива Лонга. Часть вод из Восточно-Сибирского моря через этот пролив выносятся в Чукотское море. Постоянные течения часто нарушаются более сильными ветровыми течениями. Влияние же приливных течений относительно невелико.

В Восточно-Сибирском море наблюдаются правильные полусуточные приливы. Наиболее отчетливо приливы выражены на северо-западе и да севере, где приливная волна только входит в пределы моря. По мере движения на юг они ослабевают, так как океанская приливная волна в значительной степени гасится на мелководье, поэтому на участке от Индигирки до м. Шелагского приливные колебания уровня почти не заметны.

Годовой ход уровня моря характеризуется максимально высоким его положением в июне—июле, когда имеет место обильный приток речных вод. Сокращение материкового стока в августе ведет к понижению уровне на 50—70 см. В результате преобладания нагонных ветров осенью, в октябре происходит подъем уровня. Зимой уровень понижается и в марте—апреле достигает своего самого низкого положения. В летний сезон очень ярко выражены сгонно-нагонные явления, при которых колебания уровня часто бывают 60—70 см. Быстрая и резкая смена положений уровня — одна из характерных черт прибрежных районов моря.

На свободных ото льда пространствах моря развивается значительное волнение. Оно бывает наиболее сильным при штормовых северо-западных и юго-восточных ветрах, имеющих самые большие разгоны над поверхностью чистой воды. Максимальные высоты волн достигают 5 м, обычно их высота 3—4 м. Сильное волнение наблюдается главным образом в конце лета — начале осени (сентябрь), когда кромка льда отступает к северу. Западная часть моря более бурная, чем восточная, а его центральные районы относительно спокойны.

Восточно-Сибирское море — самое ледовитое из морей России, с октября — ноября по июнь — июль оно полностью покрыто льдом. В это время преобладает принос льдов из Центрального Арктического бассейна в море, в отличие от других морей Арктики, где превалирует выносной дрейф льда. Характерная особенность льдов Восточно-Сибирского моря — значительное развитие припая зимой, широко распространенного в западной мелководной части моря, где полоса припая достигает 400—500 км ширины, соединяясь с припаем моря Лаптевых. В центральных районах моря полоса сужается до 250—300 км и к

востоку от м. Шелагского представляет собой узкую прибрежную кромку шириной 30—40 км.

За припаем располагаются дрейфующие льды. Обычно это однолетний и двухлетний лед толщиной 2—3 м. Преобладающие зимой ветры южных румбов часто относят дрейфующие льды от северной кромки припая. В результате этого появляются значительные пространства чистой воды и молодых льдов, образующие Новосибирскую на западе и Заврангелевскую на востоке стационарные заприпайные полыньи. В начале лета после вскрытия и разрушения припая кромка льдов изменяет свое положение под действием ветров и течений.

Однако льды всегда встречаются к северу от полосы о. Врангеля — Новосибирские острова. В западной части моря на месте обширного припая формируется Новосибирский ледяной массив. Он состоит преимущественно из однолетних льдов и к концу лета обычно разрушается. Подавляющая часть пространств на востоке моря занята отрогом Айонского океанического ледяного массива, который в значительной мере образует тяжелые многолетние льды. Его южная периферия в течение всего года почти примыкает к побережью материка, усложняя ледовую обстановку в море.

1.2. Геологическое строение

Поскольку большая часть площади дна Восточно-Сибирского моря не обладает значительными глубинами, можно говорить о том, что оно располагается в основном в пределах шельфа, который относится к Северо-Американской литосферной плите.

В целом Восточно-Сибирское море характеризуется невысокой степенью расчленённости рельефа дна. Однако, стоит уточнить, что характер дна не однороден. Так, дно западной части моря представлено плоской мелководной равниной, а в южной части отмечаются неглубокие желоба, которые характеризуют как следы древних речных долин доледникового и ледникового времени. Особенно часто такие структуры отмечаются в непосредственной близости от современной береговой линии. Наиболее крупным образованием такого типа являются остров Айон, второе образование лежит в нескольких километрах севернее мыса Б. Баранов, на глубине 20-25 м. (*Бондаренко, Виноградов, Горячев, Гусев, 2014*)

Многочисленные дельты также встречаются на глубинах порядка 15-24 м вблизи современного уреза воды. Вокруг Певекского полуострова в результате бурения, установлено наличие нескольких погребенных дельт, располагающихся в 15 м ниже современного дна. По данным вибробурения, на участках абразионных берегов дельты сложены преимущественно песчано-галечным материалом, а аккумулятивных - песком разной крупности. Мощность дельтовых отложений достигает более 5 м.

Согласно данным 1970-х годов, шельф Восточно-Сибирского моря представляет собой обширную синеклизу, которая носит название «Новосибирская мегавпадина». На юге этой структуры выделялась небольшая Айонская впадина или Чаунский бассейн, занимающий часть суши в районе Чаунской низменности, Чаунскую губу, о. Айон и прослеживающийся на шельф Восточно-Сибирского моря.

Из-за слабой геологической изученности, говорить о геологическом строении Восточно-Сибирского моря можно было основываясь, в основном, лишь на геофизических данных. На сегодняшний день существует очень небольшое количество скважин и профилей, которые формируют представление о геологическом строении данного региона. Одна из таких скважин – скважина на западном берегу острова Айон, вскрывшая кайнозойский осадочный чехол до фундамента, залегающего на глубине 671 м. Это открытие дало данные о геологических структурах дочетвертичного периода, которые формировались и накапливались в шельфовой части Восточно-Сибирского моря. Согласно полученным в ходе бурения данным, мощность палеогеновых отложений – 490 м, неогеновых – 155 м, четвертичных – 30 м.

В рамках исследовательской экспедиции ВСЕГЕИ на НИС «Иван Киреев» был выполнен большой объем работ по непрерывному сейсмоакустическому профилированию (НСАП), поскольку изученность дна акватории Восточно-Сибирского моря (за исключением отдельных участков, таких как Чаунская губа, Колымский залив, район к югу от Медвежьих островов, участок к западу от мыса Биллингса) методами НСАП и ГЛБО (гидролокация бокового обзора) крайне низкая. Путем выполнения комплексных геофизических исследований (сочетание НСАП, гидролокации бокового обзора (ГЛБО), а также эхолотных промеров) были собраны данные о различных геолого-геоморфологических образованиях: древних затопленных береговых линиях, речных долинах, криогенных формах рельефа. Все данные, полученные в результате непрерывного сейсмоакустического профилирования, гидролокации бокового обзора, пробоотбора донных отложений, в совокупности с теоретическими представлениями о геологической структуре Восточно-Сибирского моря, явились основанием для выделения 7 сейсмостратиграфических комплексов (ССК), которые непосредственно прослеживаются в пределах рассматриваемой площади и достаточно уверенно коррелируются с разрезом скважин американского сектора Чукотского моря. Комплексы группируются в несколько совокупностей, отвечающих крупным этапам геологической эволюции. *(Рекант, 2001)*

Самым нижним структурным этажом является элсмирский структурный этаж, который был сформирован в условиях древней континентальной окраины. К этому периоду приурочены ССК-7 и ССК-6, которые следует рассматривать как «добассейновый» интервал осадконакопления. Особенностью является то, что этот структурный этаж приурочен исключительно к Чукотско-Восточной мегадепрессии и не выходит за ее пределы.

Выше на этом структурном этаже залегает бофортский рифтогенный комплекс, которому был присвоен номер ССК-5. Отложения этого типа датируются J2-K1 и хорошо сопоставляются с бофортским комплексом Аляски, отвечающим этапу генеральной структурной перестройки региона, завершившемуся синхронно с открытием Канадского океанического бассейна. *(Бондаренко, Виноградов, Горячев, Гусев, 2014)*

Выше на этом рифтогенном комплексе залегают ССК-2 (E1-E2), ССК-3 (K1a-K2) и ССК-4 (K1). Вместе эти комплексы слагают нижний горизонт «бассейнового» чехла, отвечающий разным стадиям предокеанического рифтового этапа эволюции. Породы данной толщи представлены неритовыми, то есть мелководными осадками дна и морей и океанов, которые были образованы в пределах материковой отмели, а также субконтинентальными отложениями. Стоит отметить, что толща имеет достаточно сложное

строение, которое содержит явные признаки рифтогенеза, а именно полуграбены, клиноформы и следы лавинной седиментации.

Самым верхним из всех изученных комплексов является комплекс ССК-1 (N1-Q), который носит название верхнего горизонта бассейнового чехла. Он представлен толщей осадков, сформировавшейся после предмиоценового регионального несогласия, на этапе общего неотектонического погружения. (Акименко, Акименко, 2013)

По данным бурения скважины вблизи острова Айон, все четвертичные образования Восточно-Сибирского моря относятся к комплексу пород ССК-1, который был сформирован в ходе общего неотектонического погружения, а также продолжает формироваться в наши дни.

Согласно данным поисково-разведочного бурения в прибрежных районах (Безродных, Векслер, Савваитов, Стелле, 1986), проводимого в рамках геологосъемочных работ ВСЕГЕИ, состав четвертичных образований шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря довольно разнообразен и варьируется от гравелистых песков до глин и слоев торфа. Их мощность по площади колеблется в широких пределах, достигая десятков метров при заполнении палеоврезов (речные долины), а иногда выклиниваясь до первых метров. Очевидно, велика и фациально-генетическая изменчивость; в разрезах установлены, как морские, так и континентальные отложения. Кровля толщи, по-видимому, представляет собой эрозионный горизонт.

Выше по разрезу устойчиво выделяется толща накоплений (ССТ-IV), которые предположительно аккумуляровались в течение раннего и среднего неоплейстоцена (smI-II). Учитывая значительную продолжительность периода времени, в течение которого формировалась данная толща, можно предположить, что она сложена полигенетическими образованиями, в состав которых входят и морские, и континентальные образования. Согласно первичным данным непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) мощность данной толщи обычно не превышает 10 м.

Выше по разрезу залегает толща морских отложений (ССТ-III), относящаяся к верхнему звену неоплейстоцена (smIII). В составе отложений данной толщи преобладают уплотненные темно-серые алевроглины, алевриты и глины с примесью песка. Накопление толщи происходило во время Каргинской трансгрессии (потепления), которая, вероятно, превышала на 10-15 м (до 30 м) современный уровень моря (Данилов, 1980) Мощность толщи по данным НСАП может достигать 15 м. Стоит отметить, что в пределах данной толщи сигнала фиксируются зоны предполагаемой газонасыщенности отложений. Можно предположить, что эти газопроявления обусловлены выходами метана за счет таяния

многолетней мерзлоты.

Над толщей морских отложений, выделяется толща с континентальными образованиями (ССТ-II), которая приурочена к времени сартанского похолодания (Алексеев, 1984), которое, согласно различным источникам, датируется в пределах от 10 тыс. лет назад до 37 тыс. лет. назад. (Архипов, 1991; Арэ, 1985) Осадки этой толщи встречаются довольно локально и их мощность редко превышает несколько метров. Представлены они, как правило, алевритистыми отложениями. (Анисимов, Тумской, Саватюгин, 2002)

Далее по разрезу установлены морские голоценовые осадки (ССТ-I), которые развиты на большей части шельфа и перекрывают различные по возрасту нижележащие толщи. Важно отметить, что, судя по пробам грунтов, отобранных бокс-корером и грунтовыми трубками, зачастую эти отложения имеют небольшую мощность и иногда не превышают 10-15 см. Максимальная их мощность фиксируется преимущественно на глубинах моря более 40-50 м, но и здесь она обычно не превышает 15 м. По данным донного пробоотбора (с использованием грунтовых трубок и бокс-корера) морские голоценовые отложения представлены серыми, светло-серыми, иногда с зеленоватым оттенком, алевропелитовыми, пелито-алевритовыми и пелитовыми илами. Почти повсеместно присутствует примесь песчаных зерен, а также гравелистых и щебнистых обломков за счет ледового разноса.

Согласно литературным данным, начиная с конца сартанского времени, осадконакопление происходило в условиях трансгрессии, причем в отдельные периоды ее развития уровень моря превышал современный на 4-8 м. (Вейнбергс, 1990)

На значительной части площади до глубин 50-60 м, за исключением некоторых районов в проливе Лонга, осадки в той или иной мере переработаны ледовым выпаживанием. Только локально толща морских алевропелитовых осадков характеризуется ненарушенной стратификацией.

В прибрежных районах материкового побережья на глубинах менее 20-30 м, выделяются поля более грубозернистых осадков, которые обычно представлены миктитами (реже относительно сортированными песками), которые обогащены грубообломочным материалом (щебень, дресва, гравий), содержание которого может достигать 70-80%. Эти осадки отнесены к отложениям волновых прибрежных фаций морского ундулия (mvprH).

Отдельно на карте четвертичных образований выделяются лагунные отложения, которые подразделяются на лагунные нефелоидные отложения (mnlH) (алевриты,

пелитовые алевриты, алевропелиты) и отложения прибрежных фаций морского ундальвия (mvIИ). Эти отложения картируются не только в «классических» лагунах материкового побережья, к ним отнесены и осадки Чаунской губы, т.к. характер осадконакопления в этом полузамкнутом бассейне весьма существенно отличается от примыкающих мелководий открытого моря.

1.3. Характеристика поверхностных донных отложений и процессов седиментации

Около 12 тыс. лет н. арктические моря Северного-Ледовитого океана вступили в новую эпоху развития, которая не завершилась и по сей день – эпоху голоценовой трансгрессии.

В большинстве своем осадки, сформированные в голоцене, имеют преимущественно алевролитоглинистый состав и характеризуются слабой степенью уплотнения (1.4-1.7 г/см³). (Яшин, 1999) Яркой отличительной особенностью голоценовых осадков является наличие трубочек полихет и гидротроилита, а также несогласное залегание на более плотных (1.9- 2.2 г/см³) осадках плейстоцена.

Природа голоценовых осадков в подавляющем большинстве - морская терригенная с заметным влиянием аллювиальных фаций в прибрежной части шельфа и ледово-морских на севере акватории. (Белов, Лапина, 1961) Также встречаются биогенно-карбонатные осадки, которые представлены обломками двустворок и детритом баянуса.

Поскольку в настоящее время отсутствуют какие-либо значительные движения на территории Северного-Ледовитого океана, то большая часть донных отложений образуется вследствие поступления вещества с суши. Первым рубежом, где начинается интенсивная аккумуляция поступающего вещества, является прибрежная зона и, прежде всего, барьер «река-море». (Яшин, 1999)

При анализе распределения мощностей современных осадков на шельфе, легко отметить, что, по-видимому, за счет постоянной переработки течениями и волнениями значительная часть взвешенного и влекомого материала выносится в открытую часть бассейнов морей. Причем было установлено, что наиболее крупные частицы поступающего с суши материала (алевролитовая и песчаная фракция) не переходят во взвешенное состояние и в дальнейшем не переносятся в глубоководную часть акватории, как, например, пелитовая или мелкоалевролитовая фракции, а остаются в более мелководных зонах.

Механическая дифференциация вещества, осаждаемого в шельфовой зоне происходит слабо, так как этот процесс подавляется наличием продолжительного устойчивого ледового покрова (Prothero, Schwab, 1996), который активно гасит волновую деятельность. Роль льда в процессе формирования и накопления осадков достаточно велика, так как он не только препятствует сортировке осаждаемого с суши вещества, но еще и сам влияет непосредственно на процесс осадконакопления. В процессе вытаивания из льдов в моря поступает большое количество вещества (от пелитового до крупнообломочного). Распределение этого материала никак не коррелируется ни с

глубиной бассейна, ни с осаджением относительно береговой линии и происходит хаотично, так как зачастую процесс таяния льдов сопряжен также с процессом дрейфа.

Отмеченные особенности ледового режима и рельефа дна, а также тесно связанные с ними процессы динамики водной массы определяют и направленность литодинамических процессов, все многообразие которых позволяет выделить на шельфе области, в пределах которых доминируют:

- 1) процессы устойчивой аккумуляции;
- 2) процессы неустойчивой аккумуляции и перемыва;
- 3) процессы размыва. (*Яшин, 1999*)

Процессы устойчивой аккумуляции являются ведущими в приустьевых частях рек в пределах акватории, а также на обширных участках внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря. На внутреннем шельфе процессы такого типа аккумуляции локализуются в пределах отрицательных структур. Здесь формируется стратиграфически наиболее полная голоценовая толща, содержащая нередко осадки всех четырех эпох голоцена (бореальной, атлантической, суббореальной и субатлантической). (*Буренков, Шевченко, 1999.*) Мощность осадков, сформированная в ходе процессов устойчивой аккумуляции вещества, в среднем составляет 2-5 метров, но иногда достигает и 10-15.

Несмотря на большую распространенность процессов устойчивой аккумуляции, доминирующими процессами для большей части арктического шельфа являются процессы неустойчивой аккумуляции и перемыва. Эти процессы господствуют не только в областях со спокойным рельефом, но и в пределах относительно приподнятых участков дна. Формирующаяся в таких условиях голоценовая толща является сокращенной по мощности и не превышает 2 метров. На участках шельфа, где процессы размыва преобладают над процессами неустойчивой аккумуляции, отложения голоцена или отсутствуют, или их мощность не превышает 0.5 м. Очень часто на таких участках на поверхность морского дна выходят средне-позднеплейстоценовые образования.

По результатам изучения теоретического материала, а также исследования проб донных отложений южной части Восточно-Сибирского моря была составлена литологическая карта, отражающая зональное распространение различных типов осадков вещества.

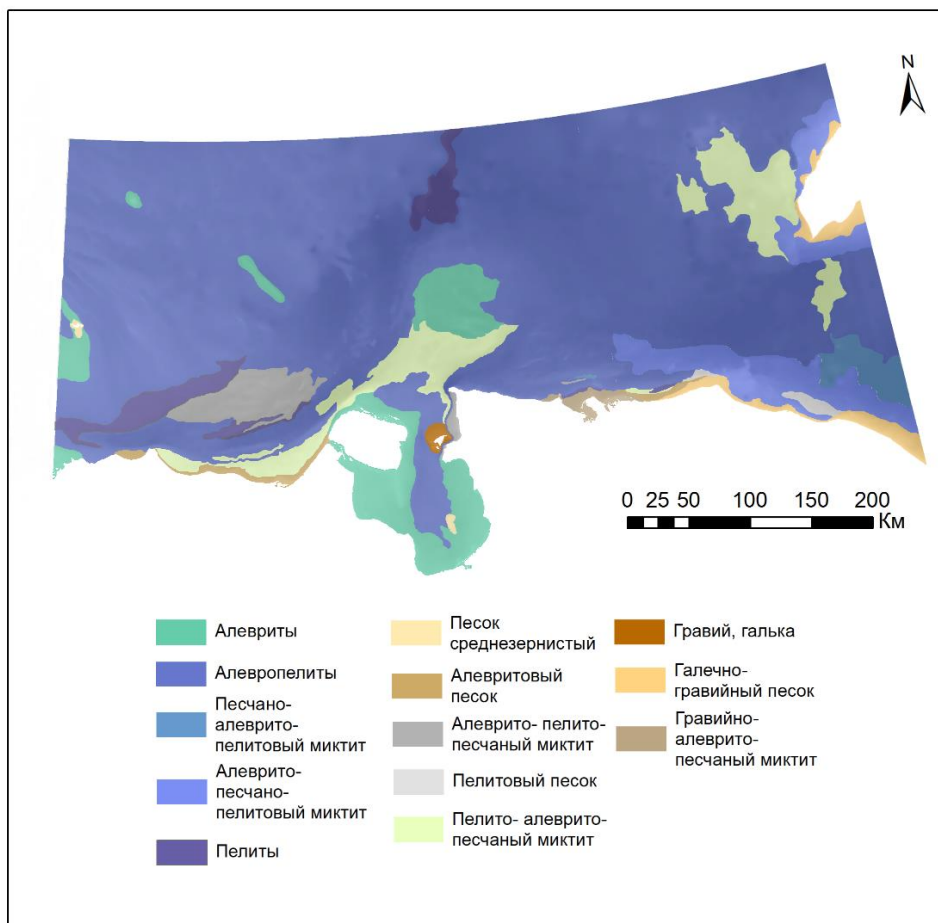


Рис.1. Литологическая карта исследуемого участка.

Источник: Выполнена автором.

Подытожив все сказанное, можно сделать вывод, что баланс вещества, формирующего голоценовую толщу, складывается за счет внутренних (размыв дна) и внешних (сток рек, абразия берегов, ледовый разнос) источников, которые играют наиболее важную роль. Величина взвешенных веществ, ежегодно поставляемых реками в арктические моря, оценивается в $102.0 \cdot 10^6$ т (Введенский, 1952), а растворенных - порядка $242 \cdot 10^6$ - $350.0 \cdot 10^6$ т (по разным оценкам).

Значительный объем вещества поступает также за счет абразии берегов. Наибольшая скорость разрушения характерна для берегов, сложенных рыхлыми породами. Анализ аэрофотоснимков показал, что на о. Новая Сибирь (Восточно-Сибирское море) скорость разрушения отдельных участков южного берега составляет 3-5 м в год. (Кошелева, Яшин, 1999)

Таким образом, за счет внешних источников (сток рек, абразия берегов ледовый разнос) в арктические моря России ежегодно поступает $701.5 \cdot 10^6$ т вещества. Это составляет только 61% от суммы ежегодно накапливаемых осадков за счет всех источников.

1.4. Характеристика месторождений Восточно-Сибирского моря

Минерально-сырьевой потенциал арктической шельфовой области России к настоящему моменту недостаточно изучен, что касается и Восточно-Сибирского моря, поэтому сложно говорить о месторождениях полезных ископаемых в акваториальной части исследуемой территории. Однако, нельзя не отметить, что прибрежная зона рассматриваемого участка, на которой расположено несколько крупных рудных узлов, слагается рыхлыми, легко подвергающимся абразии отложениями. Такие геологические и литологические условия дают право предполагать снос части породы с рудным материалом в шельфовую зону, что делает прибрежные участки акватории Восточно-Сибирского моря перспективны на поиск и добычу полезных ископаемых.

Наиболее перспективной на рассматриваемом участке является территория суши вблизи порта Певек. Большинство месторождений и рудопроявлений исследуемой территории расположены в Певекском, Куйвиеем-Гыргычанском, Пырканайваамском, Пытлянском и Пыркакайском рудных узлах. В пределах перечисленных рудных узлов располагаются крупнейшие месторождения рудного золота – Майское, Купол, Каральвеем и Двойное, а также множество перспективных золоторудных полей. Также в пределах рассматриваемой зоны находятся крупнейшие в России месторождения олова – Пыркакайские штокверки и меди – Песчанка (Баимская рудная зона). Совокупный запас золота на указанных месторождениях составляет более 950 тонн, свыше 7 тысяч тонн серебра, более 27 миллионов тонн меди и более 500 тысяч тонн олова.

Оловоносные россыпи имеют огромное значение на изучаемой территории, в этом контексте ее можно отнести к числу основных оловороссыпных регионов страны. Почти половина из 36 промышленных россыпных месторождений олова и 22 россыпепроявлений приходится на долины водотоков в Куйвиеем-Пыркакайском рудном районе. Помимо этого, исследователями обнаружена и изучена прибрежно-морская россыпь у восточного побережья Чаунской губы. Гораздо реже россыпи олова встречаются в Кэвеемском, Пытлянском, Пегтымельском, Биллингском и Кусьвеемском рудных узлах. В остальных оловорудных узлах отмечаются в основном россыпные проявления.

Важно отметить, что к Куйвиеем-Пыркакайскому рудному району относится Пыркакайский оловоносный узел, расположенного на восточном побережье Чаунской губы и занимающего площадь 4-5 тыс. км². (рис.2)

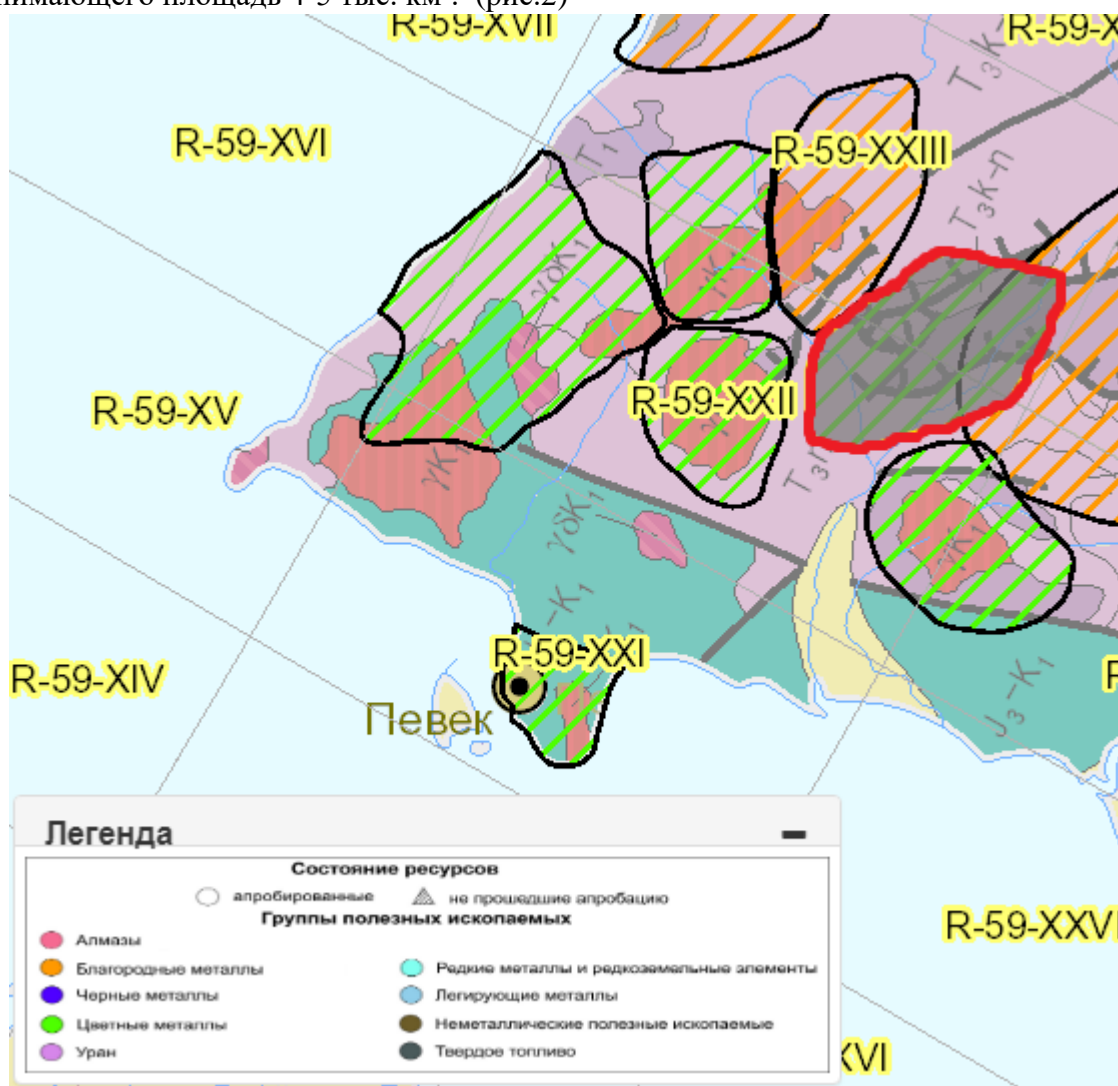


Рис.2. Пыркакайский рудный узел.

Источник: ВСЕГЕИ, Карта размещения перспективных объектов РЗ
<http://p3.vsegei.ru/>

В зоне Пыркакайского оловоносного узла выявлено три рудных поля: Первоначальное, Нагорное и Незаметное, в пределах которых разведано три крупных штокверка — Первоначальный, Крутой, Центральный, расположенные на расстояниях 750—800 м друг от друга, а также несколько мелких штокверковых тел — Оперяющий, Южный и Восточный.

Наиболее известным месторождением Пыркакайского рудного узла является Пыркакайское месторождение, относящееся к касситерит-кварцевой формации и локализованное в песчано-сланцевых отложениях триаса, прорванных многочисленными дайками лампрофиров и кварцевых порфиров. Рудные тела этого месторождения представлены тремя линейно-вытянутыми в меридиональном направлении штокверками и

целым рядом небольших штокверковых зон. Руды представлены песчано-сланцевыми породами, пронизанные кварцевыми прожилками, которые в результате предрудных процессов были превращены в метасоматиты с большим содержанием серицита, турмалина и пирротина. Кварцевые прожилки содержат, кроме касситерита, в заметных количествах сульфиды железа, мышьяка (арсенопирит), цинка, меди, а также вольфрамит, флюорит, топаз и другие минералы. (Авдонин, Бойцов, Григорьев, Семинский, Солодов, Старостин, 2005)

Крупным месторождением касситерит-силикатной формации является месторождение Валькумей в южной части Певекского полуострова. (рис.3)

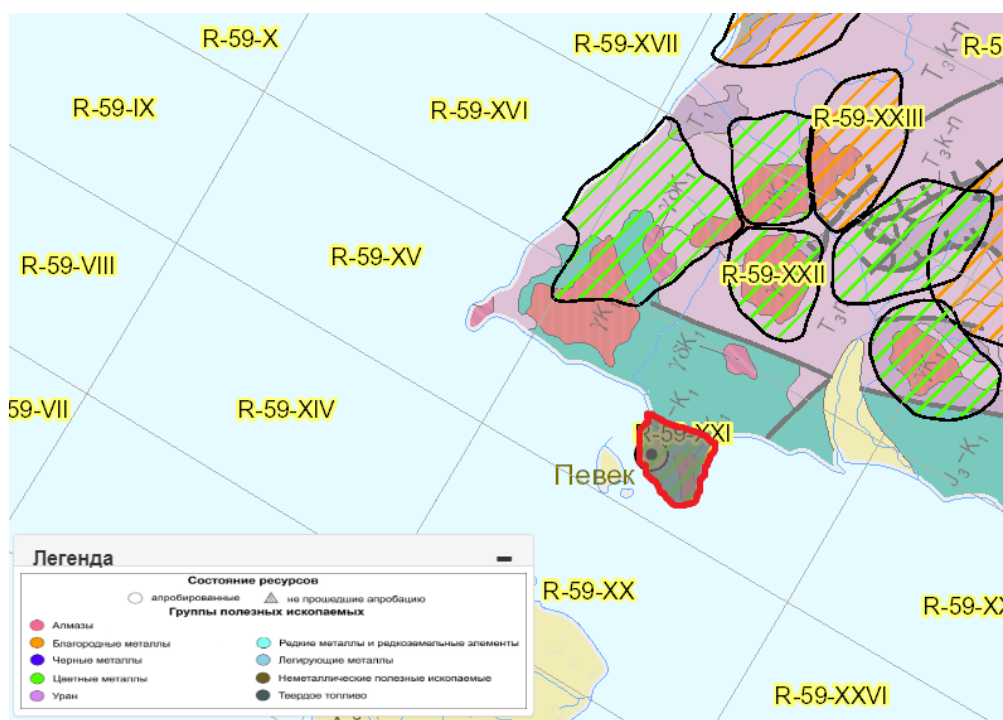


Рис. 3. Певекский рудный узел.

Источник: ВСЕГЕИ, Карта размещения перспективных объектов РЗ
<http://p3.vsegei.ru/>

Многочисленные рудные тела локализованы главным образом в эндоконтактовой зоне интрузива верхнемеловых гранитоидов, прорывающего песчано-глинистые толщи нижнего мела. Оруденение представлено малосульфидными рудами кварц-турмалин-касситеритового типа, в которых местами встречаются скопления сульфидов (арсенопирит, меньше пирит, халькопирит, пирротин, сфалерит, антимонит и др.).

В районе Чаунской низменности оловянные россыпи представлены несколькими генетическими типами: аллювиальные, делювиально-аллювиальные и прибрежно-морские. Промышленно значимы аллювиальные россыпи, наиболее крупные из которых сосредоточены в пределах Пырканайваамского рудного узла (Валькумей-Телекайская оловоносная зона). (Рис 4)

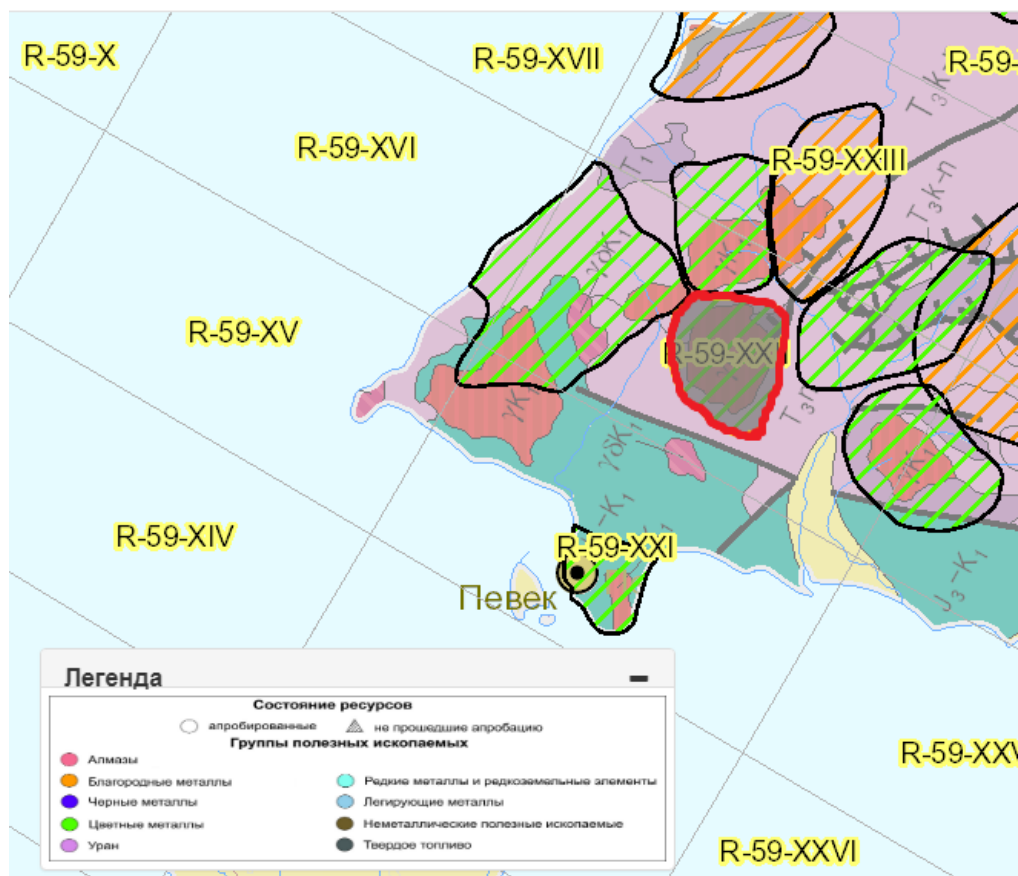


Рис. 4. Пырканайваамский рудный узел

Источник: ВСЕГЕИ, Карта размещения перспективных объектов РЗ
<http://p3.vsegei.ru/>

Россыпи этого рудного узла были сформированы за счет перемыва большого объема рудной массы штокверков. Наиболее богатая аллювиальная россыпь располагается в долине р.Пыркакайваам, ширина которой колеблется от 500 до 800 м, а длина прослеживается на 5,5 км. (Яковлев, 1986)

Меньшую роль для промышленной добычи олова играют делювиально-аллювиальные, делювиальные и элювиальные россыпи. Первые распространены в непосредственной близости от коренных источников и локализуются в небольших распадках и в верховьях ручьев, встречаясь во всех оловоносных узлах района, зачастую - на небольших глубинах. (Шведов, 2011) Элювиальные и делювиальные россыпи характеризуются неравномерным гнездовым типом распределения касситерита и связаны с участками распространения оловоносных штокверков, в меньшей степени - жильных проявлений. Несмотря на высокий уровень содержания олова в отдельных пробах, средние содержания металла на массу невысокие и промышленные концентрации возникают только при разрушении крупных месторождений этого типа, при этом балансовые запасы не превышают первых сотен тонн.

Наряду с оловом, значительной промышленной ценностью в данном районе обладает золото, представленное, в свою очередь, 3 месторождениями, 25 рудопроявлениями и многочисленными (более 150) пунктами минерализации. Проявления золотой минерализации относятся к золото-кварцевой, золото-сульфидно-кварцевой и золото-серебряной формациям. Присутствие заметных количеств золота отмечается также в олово-серебряно-полиметаллических и медно-молибденовых рудах. (Лаломов, Таболич, 2004)

Среди наиболее важных проявлений золота можно выделить месторождение Майское, которое относится к золото-сульфидной формации, и перспективное рудопроявление Эльвений, относящееся к тоже же формации. Второстепенное значение имеют рудопроявления золото-сульфидно-кварцевой и золото-серебряной формаций.

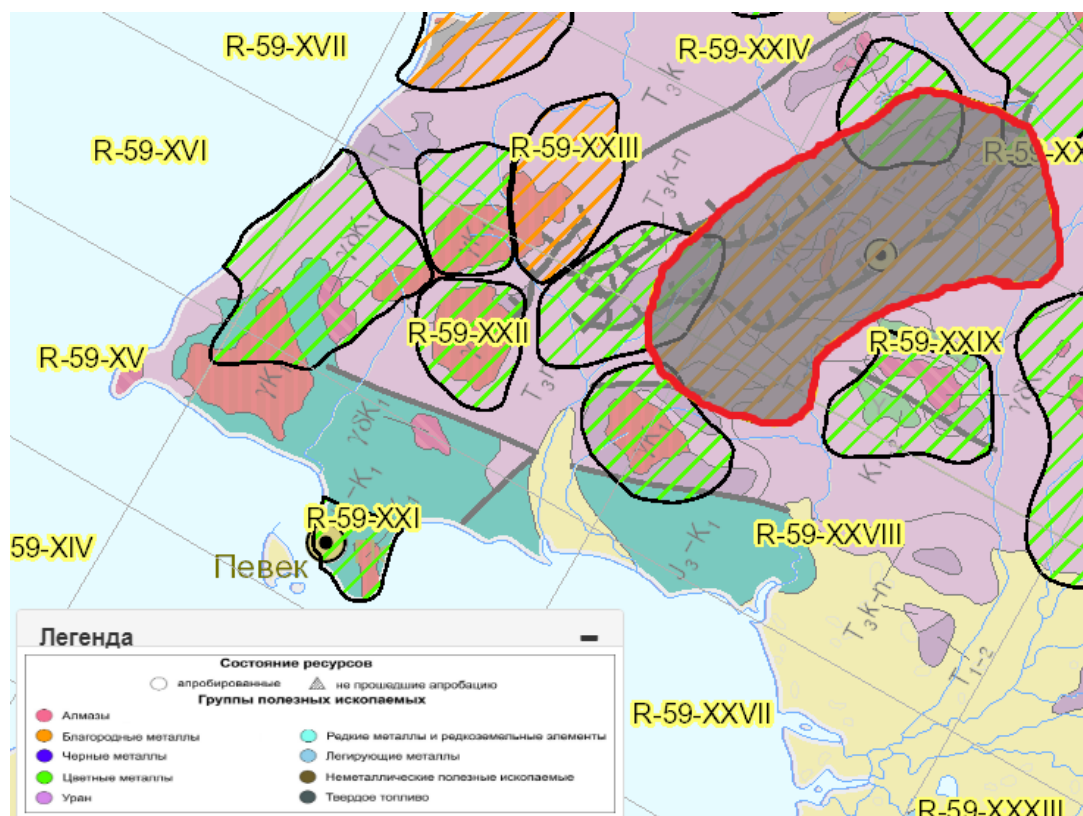


Рис. 5. Ичуемский рудный узел

Источник: ВСЕГЕИ, Карта размещения перспективных объектов РЗ

<http://p3.vsegei.ru/>

Месторождение Майское - коренное месторождение золота, относящееся к Ичуево-Паляваамскому золоторудному району (рис. 5) Центральной Чукотки. Это месторождение входит в пятерку крупнейших золоторудных месторождений России.

В состав месторождения входит порядка 20 рудных тел, мощность которых составляет 2-4 метра, а протяженность варьируется от 20 метров до 1,1 км. Рудные тела, представлены минерализованными зонами дробления в основном с отчетливыми

геологическими границами и включают в себя тонкокристаллические вкрапленности золотосодержащих сульфидов, преимущественно арсенопирита и пирита. (Анисимов, Тумской, Саватюгин, 2002) Несмотря на то, что месторождение было открыто еще в 70-х годах прошлого столетия, и первые попытки добычи руды были предприняты в 80-х годах, активное освоение месторождения началось лишь в 2013 году с запуском обогатительной фабрики.

Месторождение Майское является скорее исключением для изучаемого участка территории, поскольку большая часть залежей золота представлена месторождениями и рудопроявлениями россыпного типа, большая часть которых расположена в низко-среднегорном рельефе, характеризуемом хорошо разработанными речными долинами.

Отложения золота на шельфе Восточно-Сибирского моря получили достаточное внимание только в современных исследованиях. Подавляющая часть известных россыпей локализована в верхнечетвертично-современных, реже - в неоген-среднечетвертичных отложениях. Однако большинство золота в россыпях современной гидросети высвободилось из коренных источников в более ранние этапы развития рельефа. (Зелинская, 1998) Как и в оловянных россыпях, генетические типы золоторудных месторождений представлены аллювиальными, делювиально-аллювиальными и прибрежно-морскими россыпями, из которых промышленно значимыми являются аллювиальные. (Иванова, Смирнов, Ушаков, Черкашев, 2000)

Также стоит отметить, что золотоносность прибрежно-морских отложений Восточно-Сибирского моря показывает также опробование колонковых скважин, пробуренных со льда на верхних отложениях шельфа. Если отслеживать положение относительно береговой линии, то, как правило, эти ореолы повторяют береговую линию. В настоящее время не установлено промышленных прибрежно-морских россыпей, но достаточно высоко оцениваются перспективы их обнаружения. (Иванова, Смирнов, Ушаков, Черкашев, 2000)

2. Методы и материалы

2.1. Методика полевых исследований и отбора проб

Для проведения полевых геолого-геофизических и геохимических работ на прибрежной территории ВосточноСибирского моря в рамках темы «Создание комплектов Государственной геологической карты масштаба 1:1000000 листов R-56-60 (акваториальная часть)» ВСЕГЕИ в 2018 году была организована экспедиция на НИС «Иван Киреев» (рис. 6).



Рис. 6. НИС «Иван Киреев».

Источник: ВСЕГЕИ – «Информационный отчет о морских полевых геолого-геофизических работах в акватории Восточно-Сибирского моря на листах R-56 - R-60».

В качестве основных, реализуемых в поле, задач были определены:

1. Уточнение особенностей геологического строения территорий;
2. Сбор данных о границах сейсмостратиграфических подразделений, которые необходимы для последующего составления карты четвертичных образований на акватории Восточно-Сибирского моря в пределах листов R-56-60;
3. Проведение донного пробоотбора для оценки возрастной и генетической приуроченности отложений, вмещающих оловоносные и золотоносные россыпи, а также для установления границ и площадей развития гранулометрических типов донных отложений,
4. Сбор данных для составления литологической карты поверхности дна и геоморфологической схемы.
5. Геологический пробоотбор

Отбор проб донных отложений, производимый для определения гранулометрического и минералогического анализа и других видов аналитических исследований, а также заверки и интерпретации данных гидролокации бокового обзора

(ГЛБО) и непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП), выполнялся в ходе всего маршрута НИС «Иван Киреев».

Всего в ходе экспедиции было сделано более 90 станций пробоотбора, на которых различными методами был собран материал для последующих исследований.

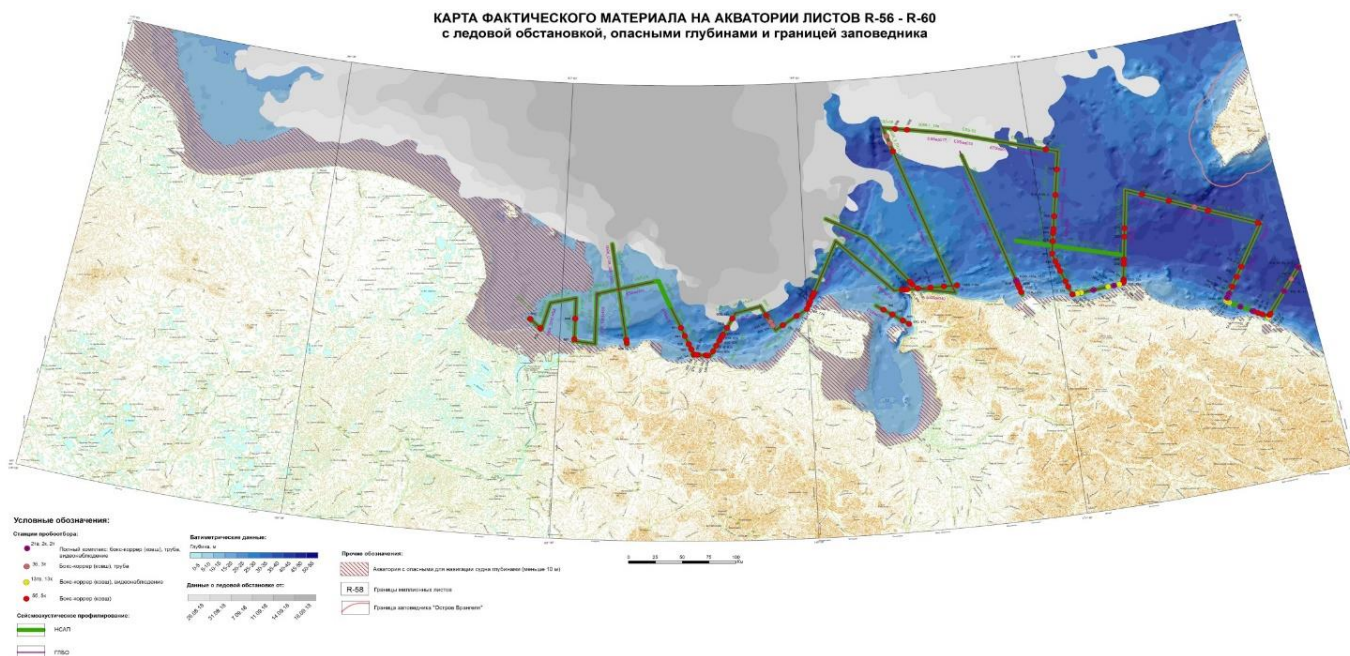


Рис. 7. Карта фактического материала.

Источник: Центр морской геологии, отдел региональной геоэкологии и морской геологии – «Информационный отчет о морских полевых геолого-геофизических работах в акватории Восточно-Сибирского моря на листах R-56 - R-60».

Согласно поставленным задачам, отбор грунтов производился с использованием бокс-корера на всех станциях пробоотбора (Рис. 8). При необходимости отбора грунтов на шлиховой анализ использовался ковш-дночерпатель конструкции Ван-Вина (Рис. 8).



а



б



Рис. 8. Оборудование для отбора проб поверхностных донных осадков: а – боксер, с камерой GoPro; б – ковш конструкции Ван-Вина.

Источник: Центр морской геологии, отдел региональной геоэкологии и морской геологии – «Информационный отчет о морских полевых геолого-геофизических работах в акватории Восточно-Сибирского моря на листах R-56 - R-60».

Для отбора ненарушенных кернов донных отложений использовались специальные грунтовые трубы, оснащенные пластиковыми вкладышами, которые помогали сохранить целостность кернов при их транспортировке в Санкт-Петербург для детального описания и послойного отбора проб на аналитические исследования (Рис. 9).

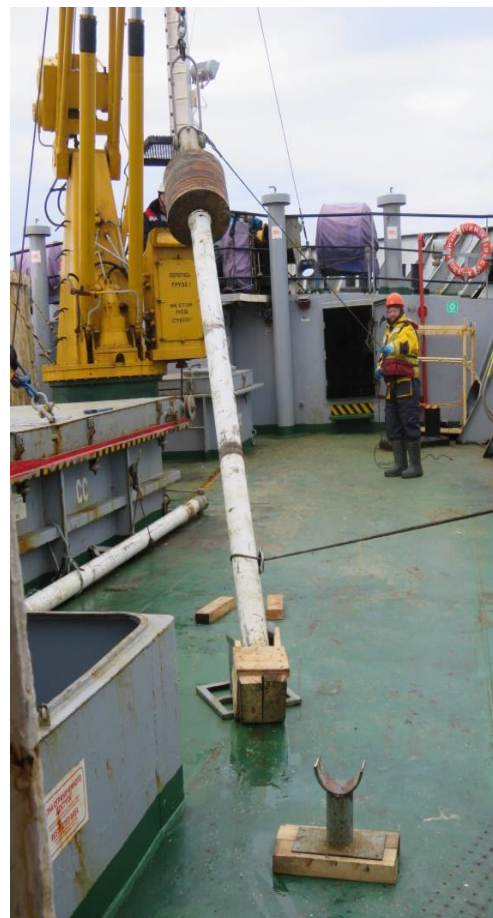


Рис. 9. Отбор проб гравитационной грунтовой трубкой.

Источник: Центр морской геологии, отдел региональной геоэкологии и морской геологии – «Информационный отчет о морских полевых геолого-геофизических работах в акватории Восточно-Сибирского моря на листах R-56 - R-60».

На борту судна проводилась лишь первичная геологическая обработка грунтов, которая заключалась в описании и фотодокументации образцов. Основными пунктами, которые отмечались при ведении полевого дневника, были: наименования грунта в соответствии с классификацией, описание цвета осадка, его текстуры. Также фиксировалась информация о наличии или отсутствии минеральных и органогенных включений, их количество, характеристика контактов и т.д. По итогу всей проделанной работы были составлены ведомости отбора проб и журнал шлихового опробования.

Отбор, упаковка, хранение и транспортировка проб для определения физических и физико-механических свойств осуществляется в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов).

При отборе глинистых грунтов на определение гранулометрического состава и геохимические исследования, использовались пластиковые мешки небольшого размера (грипперы). Отбор песчаных отложений производился в стандартные матерчатые мешки, вместимостью до 0.5 кг, а для отбора грунтов на шлиховой анализ использовались специализированные матерчатые рудные мешки.

Всего, в ходе экспедиции планировалось отобрать более 500 проб, однако план не был реализован в полной мере из-за сложных погодных условий.

При построении маршрута судна использовались данные о ледовой обстановке за 2003-2017 гг., полученные из архива обзорных карт состояния ледяного покрова Северного Ледовитого Океана, который размещен на сайте Института Арктики и Антарктики. В момент начала работ (26 августа) не закрытой льдом была акватория листов R59-R60, и, частично R58. Проход на листы R57-R56 был полностью блокирован ледяным массивом, причленявшемся к прибрежному мелководью. После анализа данных по ледовой обстановке была выполнена частичная корректировка маршрута, которая привела к выполнению лишь ½ намеченного плана по отбору проб. Детальные данные о планируемом количестве проб представлены ниже на рис. 10.

Вид анализа	Запланированный объем проб, шт	В том числе в полевых условиях	Фактическое выполнение
Геохимические пробы (ПКЭС до 45 эл., Au – AAS, Sn – ICP OES)	260	130	130
Пробы на гранулометрический анализ	130	130	130

Пробы на определение абсолютного возраста (^{14}C)	20	20	-
Пробы на минералогический анализ	40	40	40
Пробы на палинологический анализ	150	150	-
Пробы на диатомовый анализ	30	30	-

Рис. 10. Запланированный объем проб (в том числе, в полевых условиях) и фактическое выполнение плана.

Источник: ВСЕГЕИ – «Информационный отчет о морских полевых геолого-геофизических работах в акватории Восточно-Сибирского моря на листах R-56 - R-60»

2.2. Методика лабораторных исследований

2.2.1. Гранулометрический анализ

При фаціальном анализе осадочных образований важнейшая роль принадлежит гранулометрическим исследованиям. (Valsangkar, 1992) Такой вывод можно сделать на основании того, что по мнению большинства литологов, особенности распределения обломочных частиц по фракциям являются индикаторами среды осадконакопления в палеогеографическом смысле (Л.Б. Рухин, Р. Фолк, Г. Фридман и другие) или особенностей динамической структуры процесса седиментации (Р. Пассега и другие). (Кудряшова, 2015)

На изучаемой части акватории и береговой зоны Восточно-Сибирского моря, литологические исследования выполнялись для:

1. Исследования распределения поверхностных осадочных образований;
2. Определения физико-механических свойств осадочных образований дна;
3. Определения направленности современных литодинамических процессов в береговой зоне;
4. Определения направления потока наносов и т.д.

Для песчаных разностей использовался ситовой анализ, масса исходной пробы для которого составляла порядка 100 грамм. Пробоподготовка исходного материала, отобранного методом квартования, заключалась в механической дезинтеграции и дезагрегации. В ходе этих процессов пробы размачивались в воде и осторожно растирались резиновым пестиком в фарфоровой чашке, что приводило к разрушению агрегатов. После дезинтеграции осадка из него путем многократного слива верхнего (10 см) слоя суспензии, образовавшейся в ходе 20-минутного отстаивания, были удалены частицы менее 0.01 мм. В ходе следующего этапа пробы были высушены в сушильном шкафу и взвешены для определения содержания частиц менее 0.01 мм.



Рис. 11. Помещение сушильной комнаты с высушенными пробами.

Источник: Авторские материалы.

Ситовой анализ заключается в просеивании пробы песчаного осадка через набор сит аналитической просеивающей машины AS 200 с управлением «g» фирмы Retsch.



Рис. 12. Аналитическая просеивающая машина AS 200 с управлением «g» фирмы Retsch.

Источник: Материал официального сайта компании Retsch (<https://www.retsch.ru/ru/products/sieving/sieve-shakers/as-200-control/function-features/>).

Машина обеспечена программным управлением, позволяющим задавать временной интервал, амплитуду колебаний и прерывистый режим вибрации. Анализ производится на стандартном наборе плетеных сит, отвечающим требованиям ГОСТ 3584-73. В используемом наборе размеры ячеек соседних сит образуют геометрическую прогрессию и соответствует десятичной логарифмической шкале гамма В.П.Батурина. Отверстия сит имеют диаметр 2,50, 2,00, 1,60, 1,25, 1,00, 0,80, 0,63, 0,50, 0,40, 0,315, 0,25, 0,20, 0,16, 0,125, 0,10, 0,08, 0,063, 0,05, 0,04 мм. Результатом является разделение осадка на 21 фракцию (включая фракции более 2,5 мм и менее 0,01 мм).

Для алевропелитовых осадков был выполнен гранулометрический анализ методом лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора частиц «Микросайзер 201А». Метод, лежащий в основе работы прибора, заключается в регистрации интенсивности рассеянного света, угловая зависимость которого определяется размером и оптическими свойствами частиц. Результатом измерений является получение значения среднего диаметра сферы эквивалентного объема для анализируемой несферической частицы.

2.2.2. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS)

В качестве одного из основных методов анализа проб донных отложений на загрязнение тяжелыми металлами был выбран метод индуктивно-связанной плазмы на масс-спектрометре (ICP-MS), преимущество которого заключается в чрезвычайно высокой чувствительности, что говорит о низких пределах обнаружения, а также в возможности определения широкого спектра элементов.

Принцип работы масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой заключается в следующем: твердые образцы растворяют/расщепляют при помощи комбинации кислот в специализированной микроволновой системе (для сохранения летучих видов анализируемого образца). Затем полученный раствор распыляется при помощи насоса в ядро индуктивно связанной аргоновой плазмы, где под воздействием высокой температуры (порядка 7000-9000 К) вещества, содержащиеся в пробе, диссоциируют на атомы и ионизируются. Образовавшиеся положительно заряженные ионы проходят через систему ионной оптики в анализатор, где происходит фильтрация ионов по отношению массы к заряду (m/z) и детектирование интенсивности ионного потока. В результате спектрометр выдает интенсивность сигнала на заданном m/z . Измерения интенсивности преобразуются в элементную концентрацию путем сравнения со стандартами калибровки.

Анализ проб по данной методике выполнялся в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ФГУП ВСЕГЕИ).

По результатам анализа были получены данные о содержании загрязнений в 130 пробах, отобранных в южной части Восточно-Сибирского моря, на основании которых были построены карты-схемы распространения тяжелых металлов в донных осадках.

2.2.3. Рентгенофазовый анализ

Данный вид анализа относится к спектроскопическим методам исследования состава вещества и применяется с целью получения элементного состава образцов. В методе РФА используется явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке. (Guinier, 1952)

Основным методом рентгенофазового анализа служит метод порошка (метод Дебая-Шеррера), когда монохроматический пучок рентгеновских лучей направляют на поликристаллический образец. Так как кристаллы, из которых состоит образец, очень малы, то в исследуемом объеме образца их оказываются десятки миллионов. Следовательно, всегда имеются их любые ориентировки по отношению к лучу, в том числе и те, которые удовлетворяют закону Вульфа — Брэгга, устанавливающему зависимость между длиной волны рентгеновских лучей (λ), межплоскостными расстояниями (d) и углом скольжения пучка рентгеновских лучей (θ) по отношению к отражающей плоскости: $2d \sin \theta = n \lambda$. (Sarala, Koskinen, 2018)

В результате интерференции из отраженных разными кристаллами лучей образуются конусы, которые дают на фотопленке систему дифракционных максимумов различной интенсивности. Рассчитав полученную таким путем рентгенограмму, получают сведения о межплоскостных расстояниях в кристалле. Значение межплоскостных расстояний для каждого вещества строго индивидуально, поэтому рентгенограмма однозначно характеризует исследуемое вещество.

Качественный фазовый анализ проводят сравнением экспериментальных значений межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей с эталонными рентгенограммами, так как каждое вещество имеет свою «картину» расположения линий на рентгенограмме. Качественный фазовый анализ позволяет разделять и идентифицировать отдельные фазы гетерогенной системы.

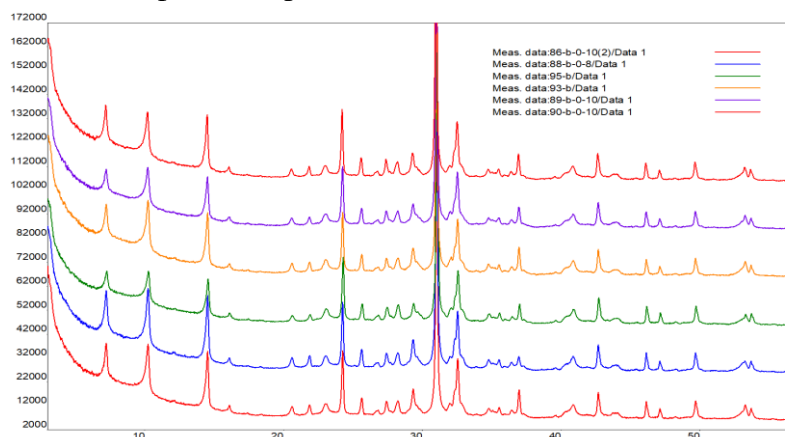


Рис.13. Качественный фазовый анализ 6 образцов без указания спектров.

Источник: Выполнено автором.

Количественный фазовый анализ является вторым этапом, когда качественный фазовый состав известен. Количественный рентгеновский фазовый анализ основан на зависимости интенсивности дифракционных отражений от содержания фазы в исследуемом многофазном поликристаллическом образце.

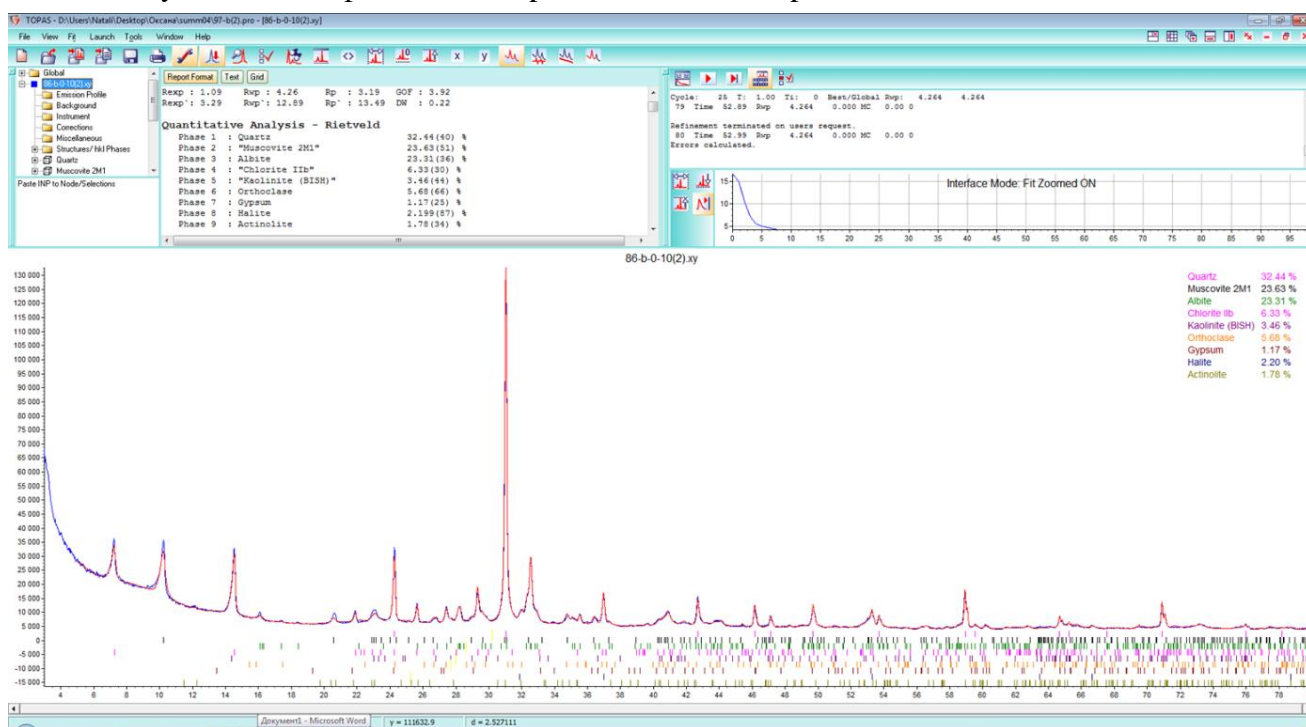


Рис.14. Количественный фазовый анализ образца 866 (0-10) с указанием условий съемки, спектров и минерального состава в весовых процентах.

Источник: Выполнено автором.

Данный метод, использованный для исследования минерального состава образцов, был выбран за счет своих неоспоримых достоинств: высокой достоверности метода, проведении анализа без разрушения исследуемого образца, простоте пробоподготовки.

Данный анализ выполнялся в ресурсном центре "Рентгенодифракционные методы исследования" Санкт-Петербургского государственного университета. Было проанализировано 52 пробы донных отложений на настольном дифрактометре Rigaku "MiniFlex II" (материал анода – стандартная отпаянная рентгеновская трубка: CoK α).

Расшифровка рентгенограмм производилась с помощью пакета программ PDXL и программы Toraz.

По результатам анализа была составлена таблица (приложение №1), данные из которой были использованы при составлении и уточнении литологической карты.

2.3. Виды нормирования содержания загрязняющих веществ в донных осадках

Донные отложения являются депонирующей средой для загрязняющих веществ из атмосферы и прибрежных территорий, а также оказывают влияние на вторичное загрязнение водных масс. Изучение уровня содержания загрязняющих веществ в донных осадках дает представление о степени загрязнения всей водной экосистемы и побережья, а также позволяет прогнозировать распространение загрязнения и планировать хозяйственную деятельность с учетом настоящего и ожидаемого уровня загрязнения экосистем.

Поскольку в настоящее время в РФ не существует единых утвержденных на государственном уровне методик и критериев оценки качества донных осадков, допускается применение различных видов нормативов, например, ПДК и ОДК для почв, или различных локальных нормативов, а также различных подходов к оценке, например, биотический, геохимический и т.д.

Биотический подход к нормированию основан на «пороговом уровне» вещества, превышение которого навредит наиболее чувствительным биологическим видам, что позволяет оценить негативное воздействие конкретного вещества на биоту и экологические риски экосистемы в целом.

Порог американской системы (ER-L - effect range-low (*Long, Morgan, 1991*)) базируется на результатах токсикологических тестов осадков с добавлением вещества в лаборатории, а также токсикологических исследований воды, соответствуя 10 перцентилем концентрации вещества, негативно влияющего на морскую экосистему. В канадской системе при разработке принятых в 1995 г. нормативов (TEL – threshold effect level (*Smith et al., 1996*)) подход использовался идентичный, но «пороговый уровень был рассчитан как квадратный корень из произведения 50 перцентилей концентрации вещества, не влияющей на биоту, и 15 перцентилей концентрации вещества, влияющей на биоту. Считается, что в пределах этого уровня концентрации поллютантов в донных отложениях не представляют серьезной опасности для морских организмов.

Усовершенствованные стандарты, принятые Канадским Советом Министерства окружающей среды в 2002 г., включают в себя два параметра – усовершенствованный TEL (interim sediment quality guideline (ISQG)) и верхний (PEL – probable effect level»), выше которого опасное воздействие на биоту считается весьма вероятным. Различия в установленных значениях связаны с методиками определения порогового уровня, а также со способами отбора донных отложений.

Геохимический подход к изучению донных отложений заключается в составлении классификации загрязнения осадков на основе выявленного геохимического фона территории. В данном случае, в качестве фона может использоваться как фон поверхностных осадков, так и «доиндустриальный фон». Примером данного подхода является классификация оценки качества донных отложений Норвежского агентства по контролю за загрязнением окружающей среды. Представленная классификация была составлена по результатам пробоотбора в водах относительно незагрязненных областей, свободных от точечных источников загрязнений. (WGMS, 2003).

Наряду с вышеупомянутыми методами выделяют также метод равновесного распределения загрязняющего вещества, который (equilibrium partitioning method) основывается на теоретическом обосновании перераспределения химических соединений между твердой и водной фазами с учетом значительно большей корреляционной связи между токсичностью/биоаккумуляцией для бентосных организмов и содержанием химического вещества в связанной (поровой) воде по сравнению с самими донными отложениями. Для практической реализации используются такие характеристики веществ как токсичность, способность к биоаккумуляции и распределению между взвешенными частицами, водой и донными отложениями и др.

Отмечается, что метод равновесного распределения можно использовать только для неполярных гидрофобных соединений и некоторых металлов. В США он был развит для металлов в связанной воде. Предложенная модель позволяет прогнозировать острую токсичность в отношении суммарного содержания некоторых металлов (Cd, Cu, Ni, Pb и Zn) в донных осадках при определении летучих сульфидов AVS (acid volatile sulphide).

Токсикологический подход к изучению донных осадков состоит из двух этапов: вначале определяется острая токсичность по результатам кратковременной экспозиции на одном или нескольких объектах, затем устанавливается максимально недействующая концентрация токсиканта по результатам хронических экспериментов. Для надежного прогнозирования влияния загрязняющих веществ на сложно организованных биологических системах необходимо тестирование на большом количестве объектов. При этом в зависимости от имеющихся токсикологических данных могут применять коэффициент AF/ACR (application factor/acute-chronic ratio): максимальное значение – 1000 - соответствует тестированию в остром опыте на одном тест-организме, значение 100 применимо для большого количества организмов или хронического тестирования на одном объекте; минимум – 10 - используется, если имеется большое количество данных по хронической токсичности на большом количестве объектов.

При разработке нормативов для донных осадков часто используется интегральный метод, основанный на интеграции данных физико-химического, токсикологического и биологического мониторинга донных отложений. Для каждого таксона на основе биоиндикационных данных по всем нормируемым загрязняющим веществам рассчитывают значения 5-го и 95-го перцентилей. 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 безопасность для 95% видов, обитающих в экосистеме, и верхний уровень интервала содержания загрязняющих веществ SEL (Severe Effect Levels), при котором выживают $\leq 5\%$ или менее таксонов в природных условиях.

Выбор подхода к изучению уровня содержания загрязняющих веществ в донных осадках определяется целью нормирования, а разрабатываемые нормативы качества донных отложений должны быть вписаны в систему водных экологических нормативов, нацеленных на сохранение устойчивого функционирования водной экосистемы, обеспечение благоприятных условий протекания процессов самоочищения, сохранение и поддержание биоразнообразия.

Еще одним часто используемым подходом является оценка качества донных отложений на основании методологических подходов, разработанных для почв, то есть с помощью нормативов ПДК и ОДК. Широкое распространение такого метода оценки донных осадков связано с удобством использования нормативной базы, которая разработана для большого количества веществ. Однако использование методов оценки загрязнения почв для донных отложений является недостаточно корректным в связи с различием генезиса и путей преобразования указанных отложений.

Все вышеупомянутые методы и нормативы имеют свои значительные преимущества, но также и недостатки. Наиболее существенным и объединяющим упомянутые подходы недостатком является совокупность геохимических и геологических особенностей той или иной территории, не учтенных при создании нормативов. Поэтому применение одного из этих методов для оценки уровня загрязнений донных осадков исследуемого участка Восточно-Сибирского моря не даст полностью репрезентативных результатов.

Для исследования данного участка целесообразно применить более универсальный метод, часто используемый на практике - 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 региональные фоновые значения, «доиндустриальные» фоны или, например, кларки горных пород. Недостатком данного метода является отсутствие классификации значений коэффициентов концентрации по степени загрязнения донных осадков. Поэтому для интегральной оценки загрязнения используется суммарный индекс загрязнения донных осадков:

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

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

3. Результаты исследования

3.1. Представление результатов и математико-статистическая обработка

По результатам лабораторных исследований 130 проб на содержание тяжелых металлов были получены следующие данные (Приложение №2).

После получения практических данных была проведена их математико-статистическая обработка в программе STATISTICA 10. Первичным результатом обработки стало построение для каждого элемента опробования диаграммы «ящик с усами», которая дает наглядное представление о минимальных и максимальных значениях выборки и выбросах.

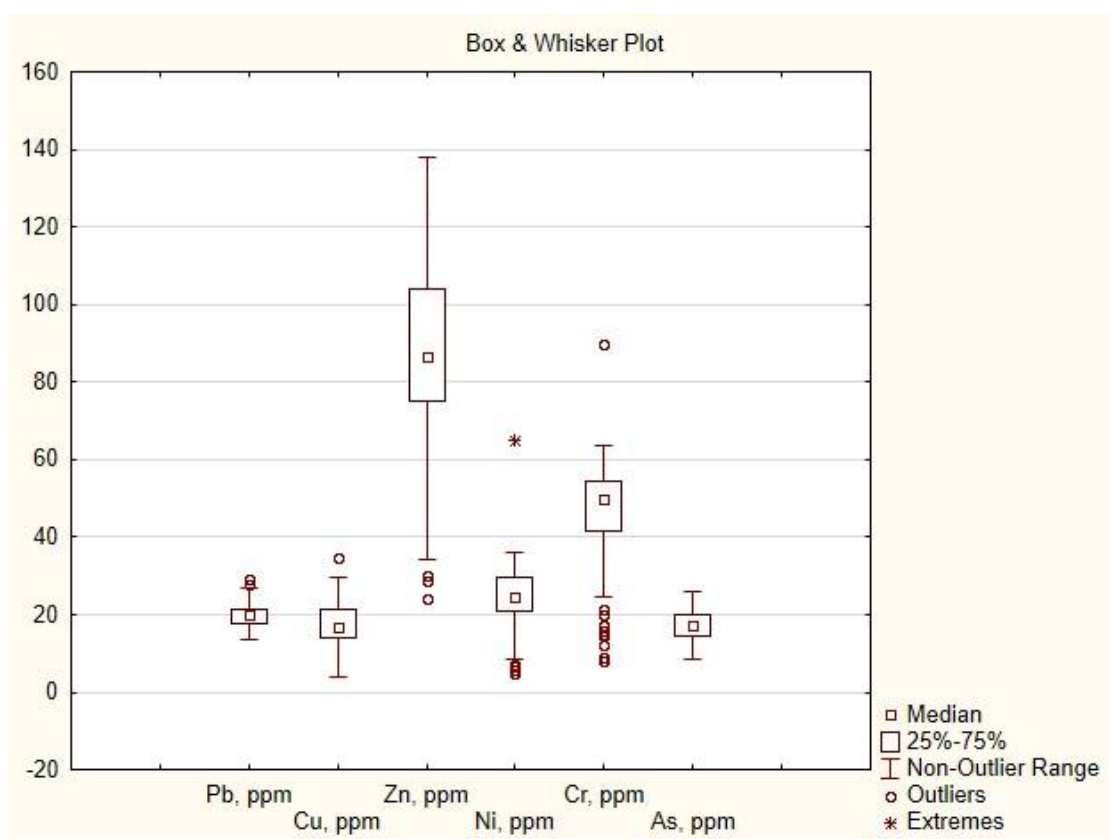


Рис. 16. Диаграмма «ящик с усами» для свинца, меди, цинка, никеля, хрома и мышьяка.

Источник: Выполнено автором.

Вторым этапом были вычислены медианные значения в каждом из распределений металлов, которые могут быть приняты в качестве фоновых значений. Расчеты статистических параметров для тяжелых металлов и мышьяка могут быть применены в будущем геоэкологическом мониторинге. Полученные в рамках мониторинга новые данные можно будет сравнить с медианными значениями и оценить величину отклонений от них. Если будут наблюдаться превышения медианных значений, то можно сделать предположение о загрязнении.

Элемент	Количество проб	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
As	130	16,5	7,3	24,3	8,5
Cr	130	49,1	8,2	89,8	14,2
Cu	130	16,1	4,0	34,7	9,2
Ni	130	24,3	4,7	34,9	10,6
Pb	130	19,9	6,9	29,3	8,0
Zn	130	85,1	24,2	118,0	23,3

Рис. 17. Таблица с медианными значениями в каждом из распределений металлов.

Источник: Выполнено автором.

Поскольку из диаграммы «ящик с усами» видно, что в выборке присутствуют выбросы (т.е. экстремально высокие или низкие значения), для расчета медианы был применен робастный метод. Таким образом, полученные значения медианы для каждого элемента обладают свойством робастности, то есть на них не влияют выделяющиеся значения (выбросы).

Для определения структуры взаимоотношений между переменными, то есть их классификации, был применен факторный анализ. На основании критерия «каменистой осыпи», для объяснения распределения загрязняющих веществ в донных осадках, достаточно рассмотреть 2 фактора.

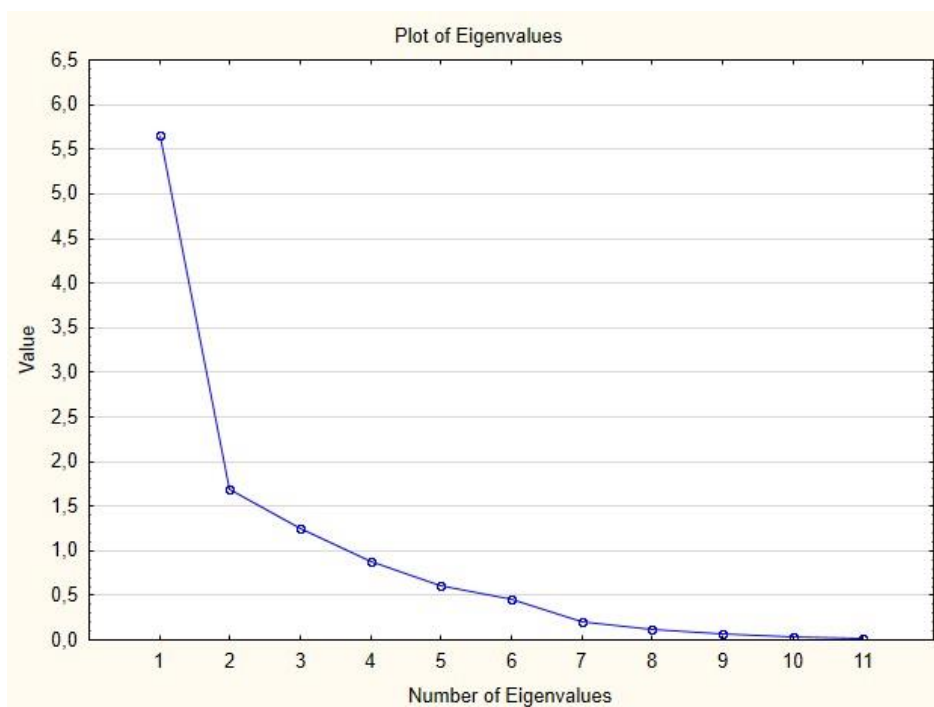


Рис. 18. Критерий «каменистой осыпи»

Источник: Выполнено автором.

Таким образом, на основании факторного анализа было выявлено 2 фактора, которые объясняют распределение тяжелых металлов и мышьяка в донных осадках Восточно-Сибирского моря.

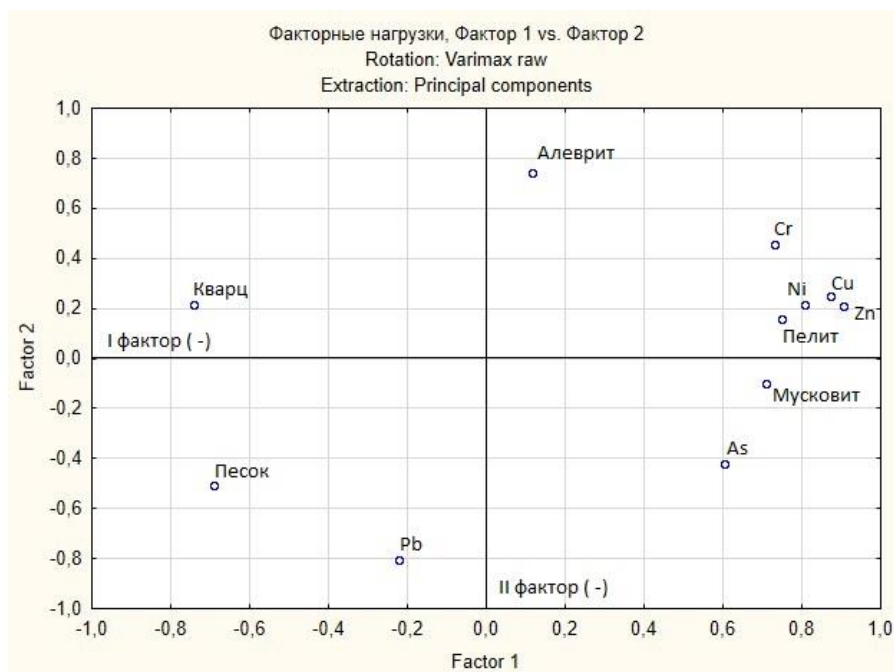


Рис. 19. Диаграмма факторных нагрузок для донных осадков
 Источник: Выполнено автором.

Можно предположить, что один из факторов, влияющий на распределение загрязнений, связан с содержанием глинистой фракции в пробах. Для того, чтобы убедиться в этом, на диаграмму факторных нагрузок для донных осадков были добавлены результаты ситового анализа по фракциям, которые наглядно отразили взаимосвязь между содержанием глинистой фракции и распределением загрязняющих элементов.

Также в статистическое исследование были добавлены результаты рентгенофазового анализа для кварца и мусковита. На диаграмме факторных нагрузок, как и ожидалось, точка мусковита оказалась рядом с точкой пелита, а кварц – между песком и алевритом, поскольку его достаточно много в осадках изучаемой территории. Полученные данные дают возможность оценки количества песка и пелита в донных отложениях акватории Восточно-Сибирского моря не только на основании гранулометрического анализа, но и на основании данных РФА, а также подтверждают достоверность ситового анализа.

Согласно данным статистического анализа, факторы наилучшим образом объясняют распределение меди, цинка, никеля и хрома. Фактор, предположительно связанный с содержанием в пробе глинистой фракции, наилучшим образом объясняет дисперсию меди, цинка, никеля и хрома и с высокой надежностью прогнозирует их значения.

3.2. Распределение тяжелых металлов в донных осадках южной части Восточно-Сибирского моря

Для грамотной оценки загрязнения донных осадков Восточно-Сибирского моря, было принято решение сравнить полученные данные с показателями загрязненности морей Северного-Ледовитого океана.

Согласно данным Ильина А.Г. (*Ильин, 2009*), процессы загрязнения большей части российских арктических морей остаются малоизученными. В большей степени исследованы хозяйственно освоенные районы, в первую очередь – Баренцево море. (*Саев, Ревич, Янин, 1990*) Также стоит отметить, что к основным и наиболее опасным поллютантам, наряду с хлорорганическими соединениями (пестициды, ДДТ), нефтепродуктами и ПАУ, относятся тяжелые металлы и мышьяк.

Например, соседнее с Восточно-Сибирским море Лаптевых, несмотря на свою слабую изученность, может характеризоваться высоким уровнем загрязнения нефтепродуктами, поступающими в основном с водами реки Лены. Ильин А. Г. (*Ильин, 2009*) отмечает, что вынос нефтепродуктов варьируется, но в целом может достигать 110-390 тыс. т (более 98% этого объема нефтепродуктов поставляются водами реки Лены). Также отмечается загрязнение вод моря хлорорганическими пестицидами, ПХБ и ПАУ, которое объясняется трансграничным переносом морскими течениями и воздушными потоками.

Донные отложения, расположенные в приустьевых областях, а также областях материкового склона и подножия, характеризуются повышенным содержанием цинка и кадмия. Однако, концентрации тяжелых металлов в донных осадках не представляют угрозы для природных экосистем, населения и хозяйственной деятельности.

В рамках работы по изучению эколого-геохимического состояния донных отложений Восточно-Сибирского моря был проведен отбор 130 проб, а также их последующий анализ на масс-спектрометре методом связанной плазмы. (Приложение №2). На основании данных лабораторного исследования, а также математико-статистической обработки, в программе ArcGIS 10.5 были построены карты распределения тяжелых металлов и мышьяка в донных осадках изучаемой территории. Также были рассчитаны геохимические аномалии элементов, что позволяет с большей достоверностью судить о природе загрязнений.

Согласно полученным данным, каждый из рассмотренных элементов (Pb, Cu, Zn, Ni, Cr и As) превышает фоновые значения в отдельных пробах. При этом было установлено, что превышения фона не соответствуют геохимическим аномалиям. Это позволяет сделать вывод, что концентрации элементов, превышающие фоновые значения, связаны с

антропогенным воздействием на прибрежные территории и шельфовую зону Восточно-Сибирского моря.

Карты загрязнения территории составлялись на основании рассчитанных для каждой из станций пробоотбора коэффициентов концентрации ($K_{кфон}$ – сравнение с фоном и $K_{кпдк}$ – сравнение с ПДК для почв для As). При построении карт были выяснены закономерности распределения загрязняющих веществ, а также потенциальные источники загрязнения.

Например, при рассмотрении карты свинца (рис.20) видно, что пробы с максимальной концентрацией элемента, приурочены к устью реки Колыма, Чаунской губе и проливу Лонга.

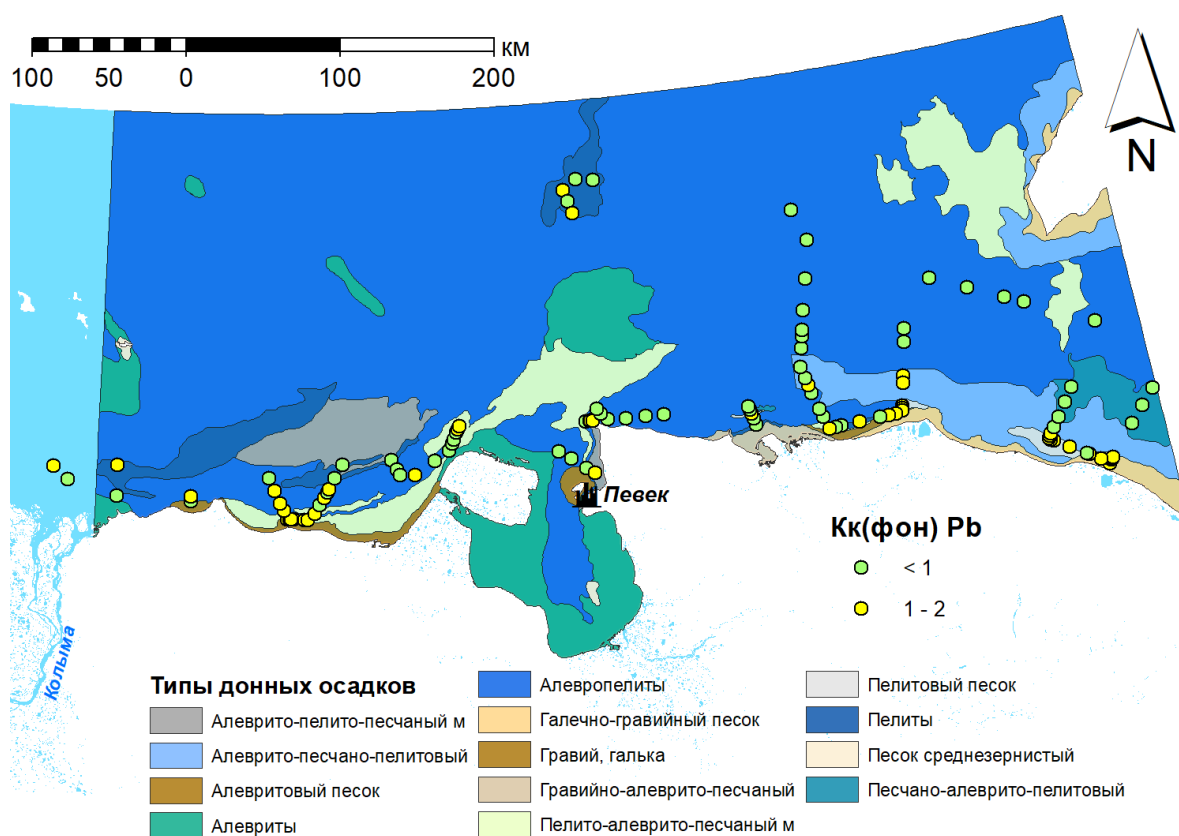


Рис. 20. Карта распределения Pb в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
Источник: Выполнено автором.

Наряду со свинцом, в пробах, отобранных вблизи устья Колымы наблюдаются повышенные концентрации цинка, никеля и меди.

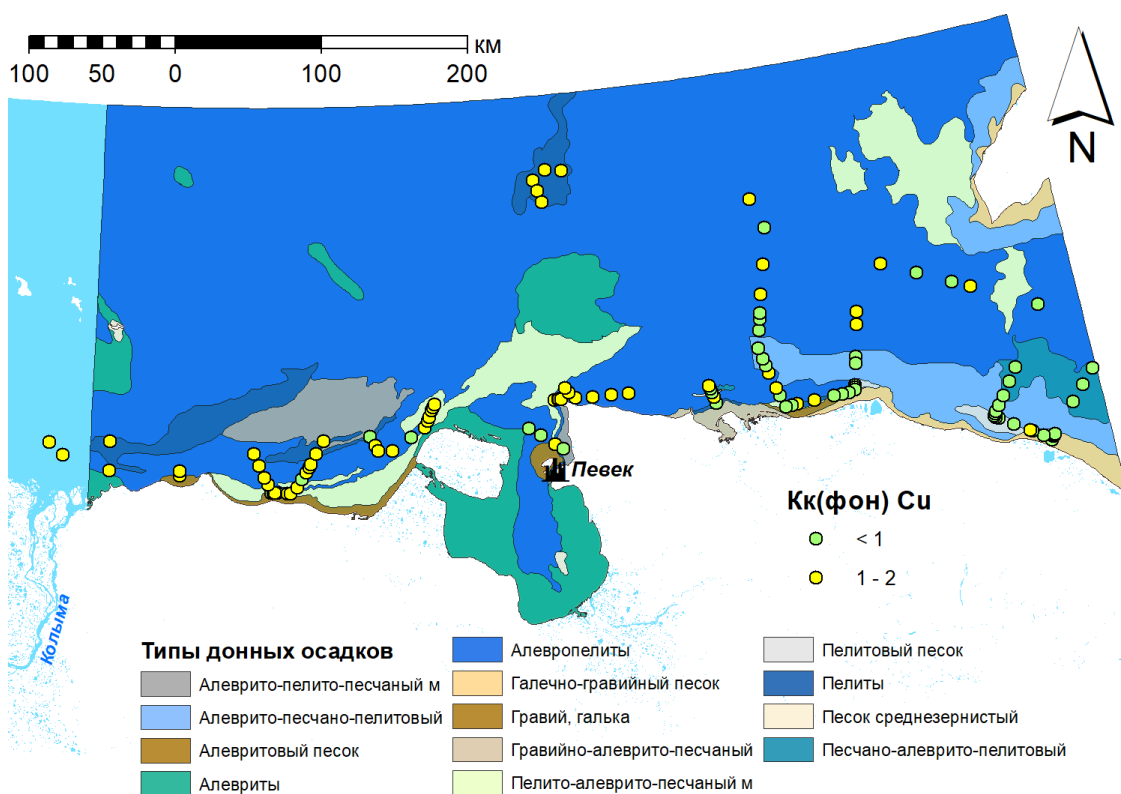


Рис. 21. Карта распределения Cu в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
Источник: Выполнено автором.

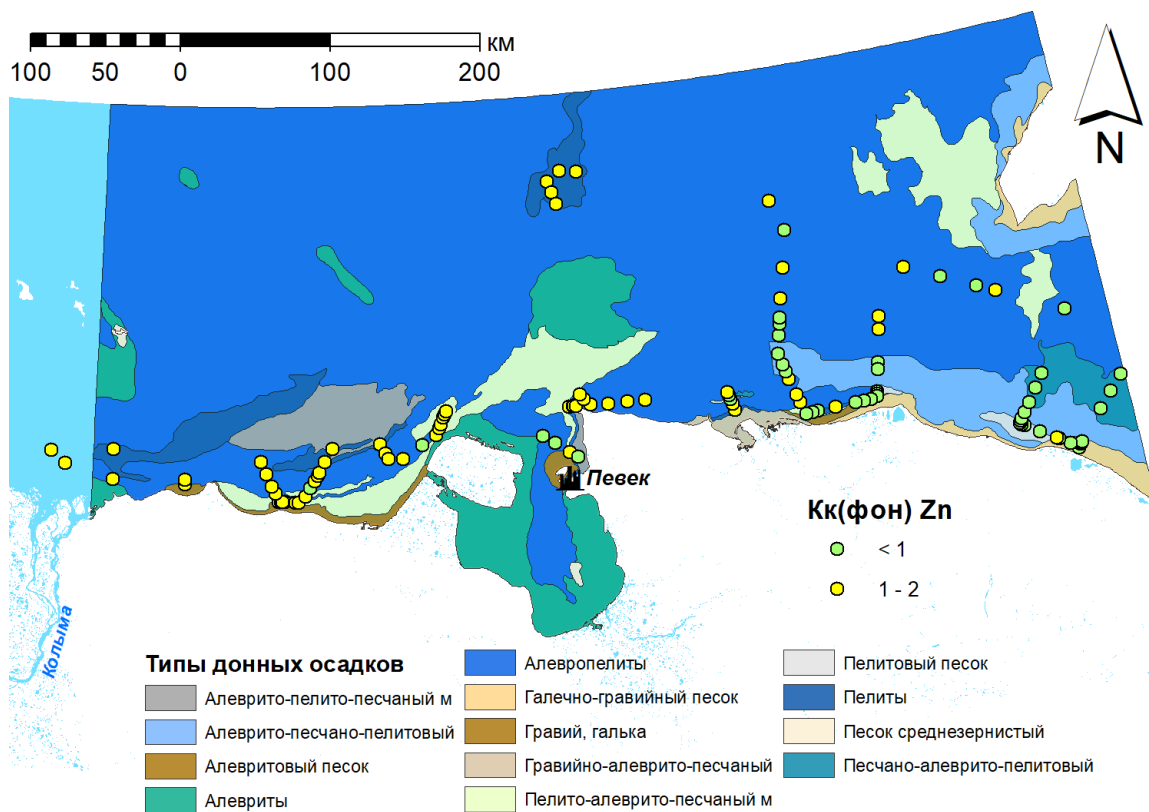


Рис. 22. Карта распределения Zn в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
Источник: Выполнено автором.

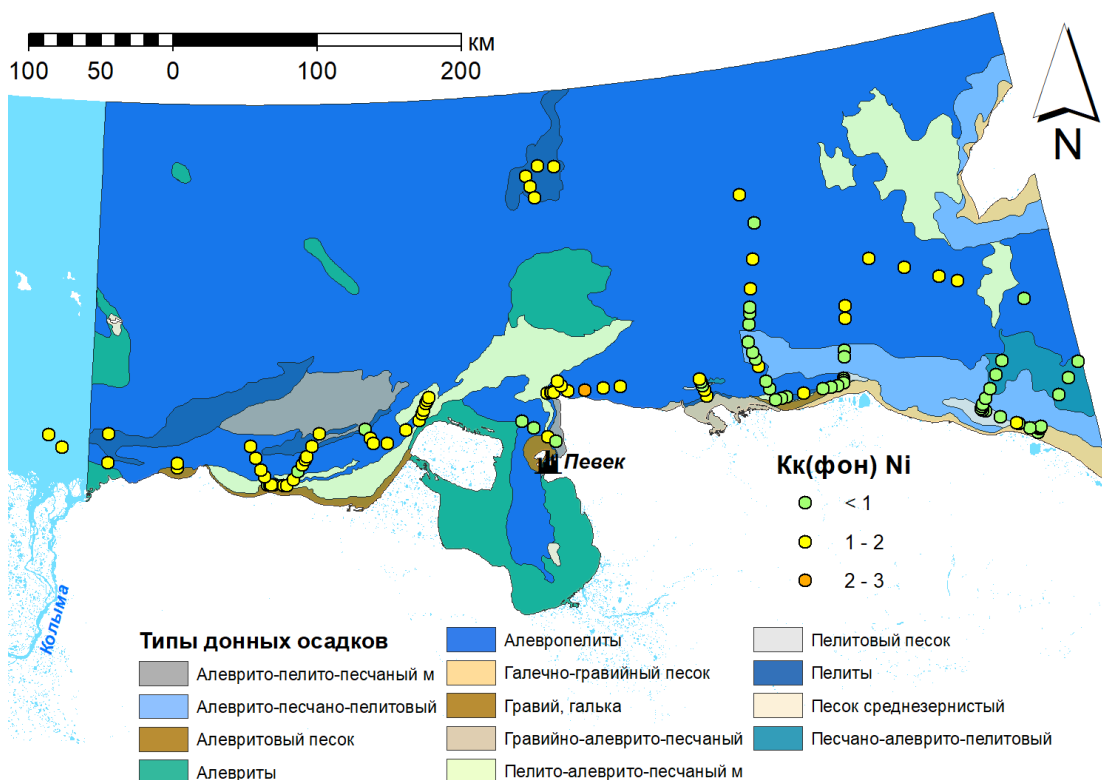


Рис. 23. Карта распределения Ni в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
 Источник: Выполнено автором.

Поскольку при анализе причин загрязнения, приуроченных к реке Колыма, необходимо рассматривать весь водосборный бассейн, то можно предположить, что повышенные концентрации элементов могут быть связаны с Колымской ГЭС, а также с многочисленными разработками золота в бассейне реки.

Другим основным источником загрязнения территории является Чаунская губа, а именно морской арктический порт федерального значения – Певек, расположенный в одноименном городе. Согласно официальному сайту порта, в период с 2016 года проводилась реконструкция порта, а в период с 2017 – расширение портовых складов. Необходимо отметить, что порт включен в состав Северного-Морского пути и функционирует ежегодно с июля по октябрь. Через порт осуществляется более четверти объема всех поставок морским путем на Чукотку, а также завоз всех генеральных грузов для компаний, работающих в Чаун-Билибинском промышленном узле, располагающемся непосредственно в Чаунской губе Восточно-Сибирского моря.

Стоит отметить, что вблизи порта Певек располагается крупнейшие месторождения рудного золота – Майское, Купол, Каральвеем и Двойное, а также множество перспективных золоторудных плей и узлов, которые были рассмотрены в главе «Характеристика месторождений Восточно-Сибирского моря». Кроме того, территория вблизи города Певек является перспективной на оловодобычу. Здесь находится крупнейшие в России месторождения олова (Пыркакайские штокверки).

Безусловно, добыча полезных ископаемых, а также функционирование порта могли привести к загрязнению территории свинцом (рис.20), никелем (рис.23), медью (рис.21), а также хромом и в особенности мышьяком.

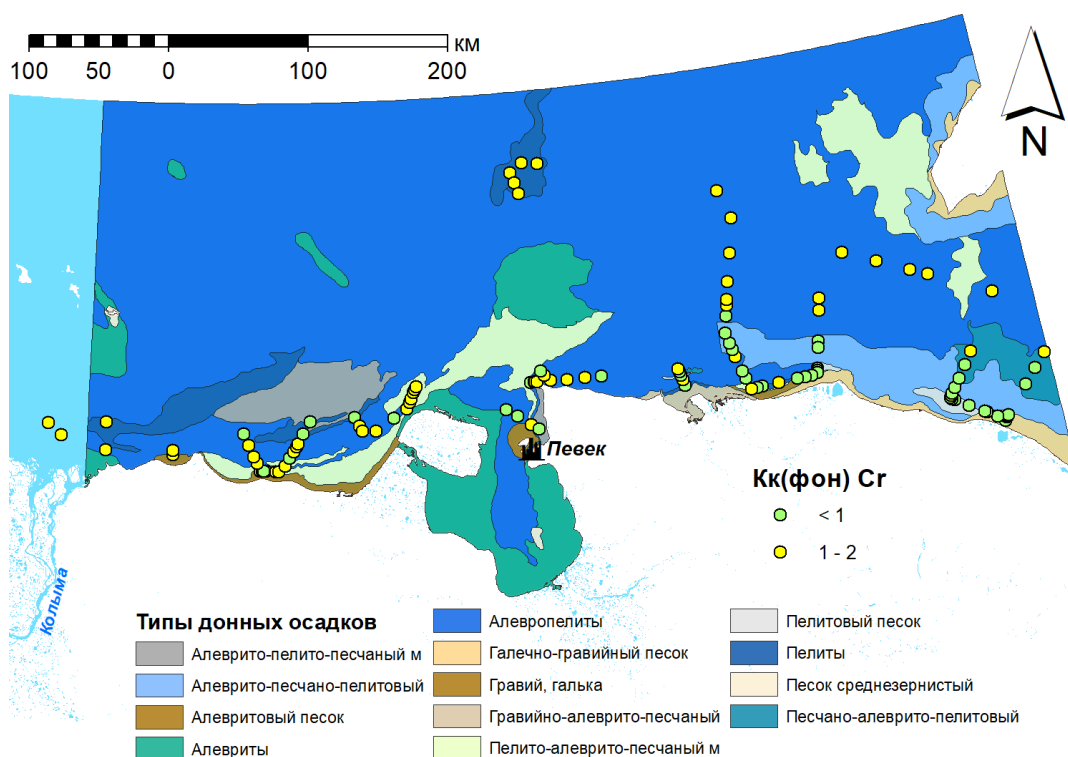


Рис. 24. Карта распределения Cr в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
Источник: Выполнено автором.

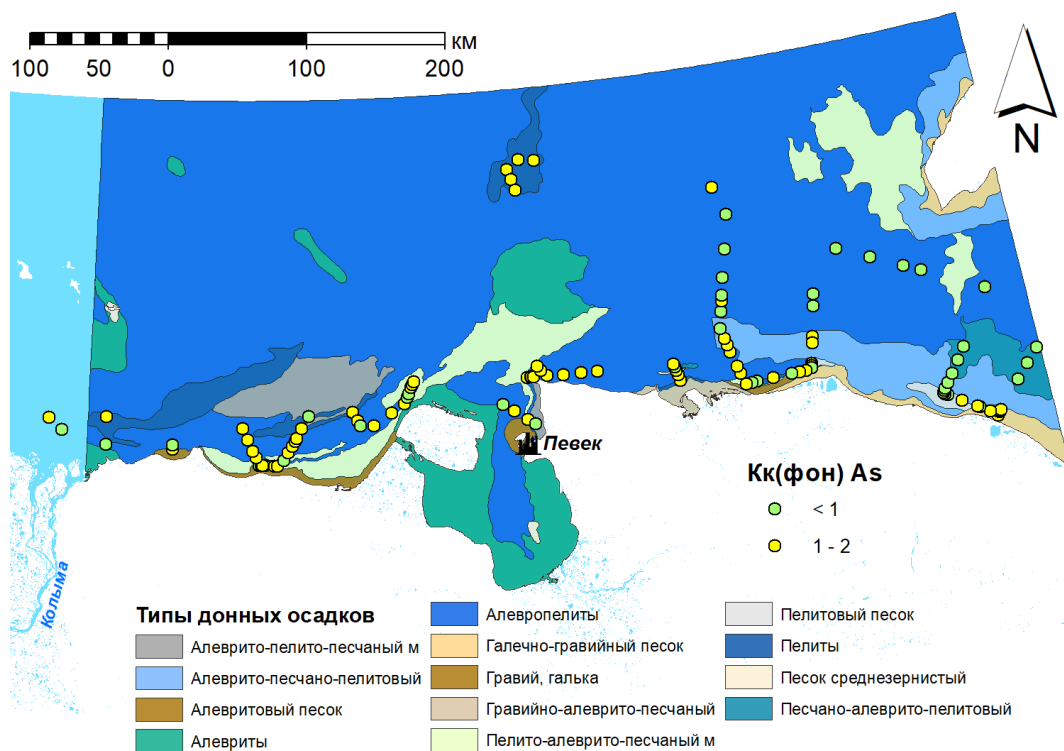


Рис. 25. Карта распределения As в донных осадках. Сравнение с фоновыми значениями.
Источник: Выполнено автором.

Именно мышьяк представляет особый интерес, поскольку это элемент I класса опасности, который может оказывать крайне негативное влияние на здоровье людей. Поэтому было принято решение построить карту распределения мышьяка в донных осадках акватории Восточно-Сибирского моря, основанную на кратности превышения имеющихся данных (полученных в ходе масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой) нормативов ПДК для почв.

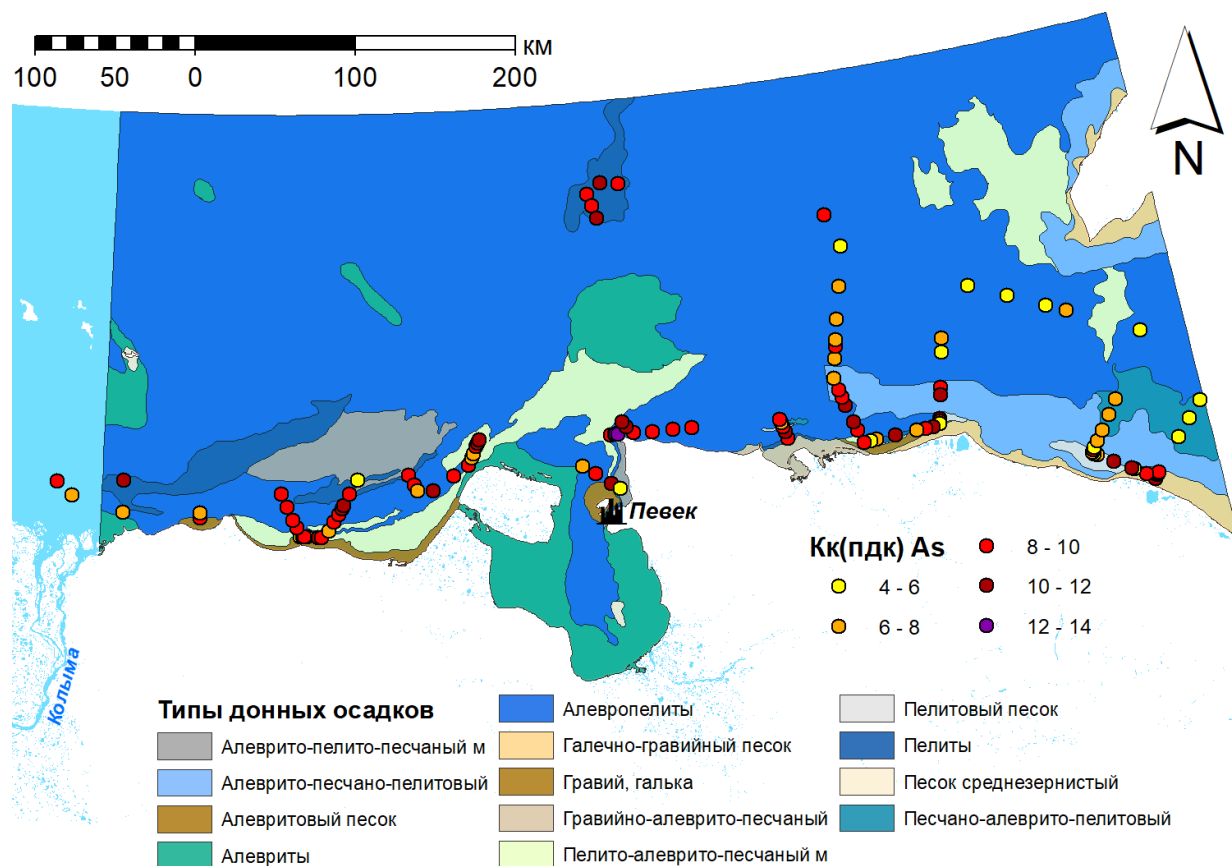


Рис. 26. Карта распределения As в донных осадках. Сравнение со значениями ПДК для почв.

Источник: Выполнено автором.

При анализе данных масс-спектропии и сравнении их с нормативами, было выявлено что наибольшая кратность превышения ПДК_{почв} наблюдается для мышьяка в районе порта Певек. В этом же районе наблюдаются наибольшие превышения фоновых концентраций. Это можно объяснить тем, что мышьяк в часто сопутствует медным и серебрянным рудам (месторождения Песчанко-Баимской рудной зоны). Также большая часть добывается при переработке мышьяковосодержащих золотых, медно-колчеданных и других руд.

Сделать однозначный вывод о загрязнении донных осадков мышьяком невозможно. Например, если сравнить полученные данные с нормативами для почв, то обнаружится превышение ПДК более чем в 10 раз. При сравнении степени загрязненности осадков Восточно-Сибирского моря (до 27 ppm) мышьяком с загрязнением донных осадков

Балтийского моря (5 ppm), наблюдается превышение более чем в 5 раз. (Данные для Балтийского моря получены по результатам рентгенофлуоресцентного анализа).

В то же время, при сравнении с региональными нормативами для Санкт-Петербурга («Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив»), разработанными ОАО "Ленморниипроект" по заказу Управления по охране окружающей среды мэрии Санкт-Петербурга, можно говорить об отсутствии загрязнения, поскольку к целевому уровню загрязнения относятся значения свыше 29 ppm.

Загрязняющее вещество	Целевой уровень	Предельный уровень	Проверочный уровень	Уровень, требующий вмешательства
As	29	55	55	55

Рис. 28. Региональный норматив распределения As в донных осадках, разработанный ОАО «Ленморниипроект».

Источник: <http://www.alppp.ru/law/okruzhayuschaja-sreda-i-prirodnye-resursy/obschie-voprosy/71/normy-i-kriterii-ocenki-zagryaznennosti-donnyh-otlozhenij-v-vodnyh-obektah-sankt-peterburg.pdf>

Для устранения противоречий и интегральной оценки загрязнения территории были рассчитаны суммарные индексы загрязнения донных осадков Zc (приложение №3) для каждой точки пробоотбора. На основании полученных данных, донные осадки изучаемой части Восточно-Сибирского моря можно охарактеризовать как чистые, поскольку ни для одной из станций пробоотбора Zc не превышает 5.

Заключение

В результате исследования южной части Восточно-Сибирского моря была выполнена эколого-геохимическая оценка состояния донных осадков изучаемой территории. На основании данных пробоотбора (130 проб), а также различных видов лабораторных исследований были построены карты распространения загрязняющих веществ (Pb, Cu, Ni, Zn, Cr и As). С помощью математико-статистической обработки данных удалось установить взаимосвязь между природными условиями и загрязняющими веществами.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Тяжелые металлы (Cu, Zn, Ni, Cr) имеют тесную связь с пелитовой фракцией, так как изоморфно входят в состав гидрослюд.
2. Свинец имеет положительную корреляцию только с песчанистой фракцией. Предположительно, это может быть связано с тем, что он присутствует в песках в виде акцессорного галенита, или другого свинец-содержащего минерала. Также можно предположить, что Pb находится в ионообменной форме и концентрируется в карбонатной фракции (на изучаемом участке она представлена кальцитом).
3. Содержания As в донных осадках этого региона очень высоки. Если сравнивать полученные данные с нормативами для почв, то результаты в 10 раз превышают ПДК. По сравнению с фоновыми концентрациями также наблюдаются превышения. Поскольку на диаграмме факторных нагрузок на донные отложения видно, что As имеет отрицательные корреляции со всеми видами осадков и тяжелыми металлами, можно предположить, что столь высокие концентрации мышьяка могут иметь антропогенное происхождение. Возможно, загрязнение As приурочено к разработке месторождений золота, а также медных и олово-рудных узлов, поскольку мышьяк достаточно часто встречается в качестве примесей на подобных месторождениях.
4. На основании рассчитанных коэффициентов Zc для каждой станции пробоотбора (приложение №3), донные осадки южной части Восточно-Сибирского моря можно охарактеризовать как чистые, поскольку для каждой из точек опробования $Zc \leq 5$.

На основании полученных результатов можно дать следующие рекомендации:

1. Необходимо разработать нормативы для донных осадков, чтобы исключить неверное использование иностранных нормативов и

нормативов ПДК/ОДК для других сред.

2. Необходима организация и проведение мониторинга на территории Арктических морей (особенно шельфовой зоны), поскольку эта территория является очень перспективной с точки зрения разведки и добычи полезных ископаемых. Восточно-Сибирское море не является исключением.
3. Необходимы более детальные исследования акватории и береговых зон арктических морей, в том числе Восточно-Сибирского моря, поскольку на данный момент эти территории являются малоизученными, что не всегда позволяет достоверно оценивать результаты исследований и делать долгосрочный прогноз.

В заключении данной работы автор выражает благодарность сотрудникам Всероссийского научно-исследовательского геологического института «ВСЕГЕИ», в особенности Григорьеву Андрею Глебовичу за предоставленные материалы; Лебедеву Сергею Васильевичу, Себровскому Константину Юрьевичу, Кобик Любовь Богдановне, а также Евдокименко Антону и Сергееву Александру за советы и помощь в создании карт; Иванюковичу Георгию Александровичу за обучение работе в программе STATISTICA 10; Зеленковскому Павлу Сергеевичу за помощь в организации исследований; Платоновой Наталье Владимировне за помощь в проведении анализов и интерпретации результатов. Особую благодарность выражаю научным наставникам – Беляеву Анатолию Михайловичу и Рябчук Дарье Владимировне за помощь в осуществлении всех поставленных задач данной работы, за помощь в проведении исследования и интерпретации полученных результатов.

Приложение №1

Сводная таблица результатов рентгенофазового анализа с данными содержания основных породообразующих минералов в весовых процентах.

Источник: Выполнено автором.

	Кварц	КПШ (ортоклаз)	Хлорит	Мусковит/Иллит	Гипс	Галит	Амфиболы	Смшанно-слоиные	Альбит	RP, %
61 к	41,1	4,9	7,8	21,8	1,3		0,4		22,7	13,70
31 к 5-10	40,7	15,0	5,6	17,8	1,7	1,5	0,6		17,1	15,26
55 к	46,4	13,6	4,6	16,5		0,3	0,3		18,4	14,34
37 к	31,7	8,3	11,6	25,3	2,5	3,5	0,9		16,2	18,19
12 к 0-2	37,4	11,8	11,1	20,4	2,1		0,5		16,7	18,25
85 к 3-10	36,9	4,8	7,3	25,7	1,3	2,1	1,6		20,4	15,11
11 к 5-10	46,7	12,2	4,4	16,3	0,8	2,2	1,1		16,2	14,18
65 б 0-5	38,6	6,2	5,7	21,0	1,7	1,4	1,2		24,3	14,02
27 б	36,2	4,5	4,5	22,5	1,9	5,4	1,7	2,1	20,0	11,69
46 б 0-6	42,1	11,6	4,8	16,7	1,8	2,7	0,9		19,4	13,55
17 к	50,2	14,8	2,1	13,4	1,0	2,3	0,7		15,7	13,21
3 б 0-5	41,8	8,9	4,2	16,8	1,3	2,5	1,3	2,7	20,6	13,45
50 б 0-6	38,2	5,0	4,4	22,4	1,4	2,5	2,2	1,6	21,5	13,28
22 б 0-6	41,5	5,7	4,2	17,5	1,2	3,0	2,0	1,8	22,3	13,41
2 к 0-2	50,5	8,0	3,7	12,2	1,7	3,6	1,2	1,5	17,6	12,98
111 б 0-12	34,8	5,6	7,9	23,9	1,6	3,5	1,3		21,5	14,59
4 к	48,3	12,4	3,2	13,4	0,8	1,1	1,2	1,8	16,9	12,63
81 б 5-10	44,1	14,6	4,2	15,7		1,0	0,5		19,4	14,34
81 б 0-2	46,8	15,3	3,6	13,3		1,0	0,6		17,8	14,99
72 к	40,0	5,9	3,7	20,5	1,9	2,0	1,1	1,6	22,4	12,69
78 б	41,8	4,7	3,1	18,4	1,2	1,2	1,3	1,1	26,0	13,03
69 б 0-5	32,0	4,6	5,3	27,2	1,9	1,9	1,7	3,1	21,1	12,14
28 б 0-5	34,1	5,4	4,6	22,5	1,8	4,2	2,3	2,1	21,7	12,89
68 б 0-10	32,9	5,4	5,3	23,1	2,4	3,1	1,8	2,6	22,0	12,50
11 к 0-2	37,5	8,4	4,2	20,0	1,3	4,0	1,6	2,1	19,8	12,68
66 к 2-10	36,3	3,6	6,8	21,7	0,5	1,8	0,2	3,1	25,3	12,16
76 к	34,1	3,9	7,7	25,1	1,1	2,1		2,5	22,5	11,45
71 к	42,9	5,4	5,0	18,1		2,2	0,4		26,0	13,15
85 б 0-3	35,8	5,7	6,7	20,7	1,3	4,2	0,1	3,6	21,0	13,01
12 к 5-10	46,3	16,4	3,0	12,2		3,0	0,7	1,3	16,1	12,20
106 б	38,7	7,5	5,0	19,4	1,4	4,1	0,2	3,4	20,0	11,76
105 к	36,3	8,0	5,9	21,6	1,6	3,8	0,4	3,0	19,2	12,05
100 б	30,1	6,0	6,9	25,6	2,1	5,4	0,3	4,2	18,5	12,89
29 б 0-5	42,0	9,5	4,0	18,3		2,8	1,4	1,9	18,5	12,57
31 б 0-5	45,3	23,1	2,8	9,0	0,8	2,5	0,4	0,6	14,9	11,09
97 б	26,9	7,0	6,3	27,2	2,2	3,9	2,5	4,4	19,7	13,61
98 б	27,1	5,2	6,6	29,8	1,9	3,5	3,0	4,2	18,9	13,25
24 к	47,1	4,9	5,1	18,0	1,7	4,5	1,4		17,3	12,97
21 к 0-10	44,0	7,9	4,8	15,6	1,0	4,7	1,5		20,5	13,59
18 к	42,1	12,0	4,8	16,0	1,9	3,6	1,2		18,7	14,17
2 к 5-10	48,5	8,0	4,2	13,8	1,3	4,5	1,3		18,5	12,80
40 к	40,5	12,9	5,2	16,1	1,2	2,9	0,7	1,9	18,6	12,10
53 к	32,1	4,7	6,1	25,8	1,9	6,4	1,5	2,2	19,2	12,50
35 к 0-2	40,2	12,1	5,2	16,9	1,4	2,2	0,9	1,8	19,4	13,31
33 к 2-10	47,7		3,3	9,6	0,8	1,4	0,6		16,9	12,54
96 б	24,9	6,4	6,7	29,1	2,2	5,0	2,6	5,3	17,9	13,77
86 б 0-10	32,4	5,7	6,3	23,6	1,2	2,2	1,8	3,5	23,3	13,49
88 б 0-8	33,2	6,1	7,2	22,6	1,1	0,9	1,5	3,5	23,8	13,36
89 б 0-10	34,3	4,3	5,9	24,7	1,7	2,0	1,8	2,6	22,6	12,45
90 б 0-10	34,0	5,9	6,6	21,1	1,7	1,9	1,4	3,4	23,9	12,67
93 б	32,0	5,3	6,6	25,1	1,6	2,1	1,7	3,4	22,2	13,35
95 б	34,5	5,1	5,9	24,7	1,5	1,6	1,3	2,7	22,8	12,51

Приложение №2

Фрагмент таблицы результатов анализа 130 проб на содержание тяжелых металлов при помощи масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Источник: Выполнено лабораторией ВСЕГЕИ.

Шифр пробы	Pb, ppm	Cu, ppm	Zn, ppm	Ni, ppm	Co, ppm	Sb, ppm	Sn, ppm	Bi, ppm	As, ppm	Ag, ppm	W, ppm	Au, ppm	Mo, ppm	Bi, ppm	Cr, ppm
18-ВСМ-1	29,3	7,51	37,8	6,63	5,74	0,6	4,93	0,21	21,4	0,057	2,36	<.002	0,75	0,21	8,21
18-ВСМ-2к(0-2)	14,1	14,6	66,5	21,1	8,39	0,82	2,53	0,17	10,9	0,095	0,81	<.002	0,68	0,17	55,8
18-ВСМ-2к(5-10)	15,3	13,1	72,5	22,3	8,67	0,89	2,54	0,19	10,3	0,096	0,65	<.002	2,38	0,19	46,8
18-ВСМ-3б(0-5)	17	13,3	72,2	21,7	9,03	0,93	2,77	0,2	9,49	0,12	0,76	<.002	1,6	0,2	46,3
18-ВСМ-4к	19,3	11,2	57,9	16,9	7,45	0,88	2,77	0,2	10,1	0,1	0,66	<.002	1,45	0,2	29
18-ВСМ-5б	25,5	3,98	24,2	4,67	4,96	0,58	3,5	0,16	16,3	0,048	1,16	<.002	<0,6	0,16	8,18
18-ВСМ-6к	29,2	10,9	34	6,69	7,08	0,75	4,34	0,21	24,3	0,072	1,43	<.002	<0,6	0,21	8,94
18-ВСМ-7к(0-10)	26,2	6,73	37	8,74	6,98	0,71	3,91	0,58	18,4	0,066	1,44	<.002	<0,6	0,58	17,4
18-ВСМ-8к	24,6	13,7	30,2	5,78	4,29	0,59	3,73	0,64	17,6	0,056	2,06	<.002	0,76	0,64	12,4
18-ВСМ-10к	27,1	5,55	42,3	9,25	5,66	0,71	3,94	0,2	11,9	0,081	1,07	<.002	<0,6	0,2	15,9
18-ВСМ-11к(0-2)	19,9	17	86,4	24,6	9,45	0,86	3,34	0,75	21	0,12	0,96	0,0022	0,71	0,75	47,7
18-ВСМ-11к(5-10)	21,9	13,4	71,5	19,4	9,19	0,85	3,31	0,25	15,8	0,11	0,96	<.002	1,52	0,25	37,8
18-ВСМ-12к(0-2)	21,8	16	83,5	23	9,46	0,83	3,36	0,31	20,1	0,11	0,99	0,0026	0,85	0,31	40,1
18-ВСМ-12к(5-10)	23,3	10,6	59,9	16,4	8,43	0,8	3,16	0,23	10,7	0,1	0,88	<.002	1,79	0,23	35,2
18-ВСМ-13к(0-2)	24,8	9,8	53,3	14	7,24	0,78	3,15	0,2	13,2	0,095	0,91	<.002	0,61	0,2	32,3
18-ВСМ-13к(5-10)	26,4	7,89	40,3	10,6	6,67	0,72	2,96	0,16	11	0,081	0,86	0,0036	1,01	0,16	27,3
18-ВСМ-14к	27,9	4,92	28,8	7,09	5,2	0,56	2,44	0,16	11,9	0,057	0,86	<.002	<0,6	0,16	14,8
18-ВСМ-15к	25	8,83	47,8	13	7,16	0,69	3,16	0,18	13,5	0,11	0,91	<.002	0,7	0,18	30,3
18-ВСМ-16к(0-2)	21,7	16	84,7	23	9,15	0,83	3,25	0,28	18,2	0,11	1,09	0,0031	0,91	0,28	50
18-ВСМ-16к(5-10)	24,5	10,8	60,5	16	7,53	0,72	2,96	0,22	12,5	0,096	0,92	<.002	1	0,22	31,3
18-ВСМ-17к	23,4	11,9	66,4	18	8,69	0,78	3,27	0,22	11,6	0,1	1,04	<.002	1,34	0,22	41,5
18-ВСМ-18к	19,2	14,9	82,7	22,8	9,82	0,94	3,24	0,25	13,7	0,12	1,1	0,0023	2,13	0,25	44,4
18-ВСМ-19к(0-10)	18,9	14,4	79,5	22,1	9,53	0,92	3,12	0,24	12,7	0,12	1,2	<.002	1,96	0,24	48,3
18-ВСМ-20б	17,4	13,8	77,6	22	9,42	0,91	3,02	0,22	14,1	0,12	1,16	<.002	1,35	0,22	47,7
18-ВСМ-21к(0-10)	15,7	14,4	79,2	22,7	9,2	0,9	2,83	0,21	12,9	0,12	2,68	<.002	1,13	0,21	54,2
18-ВСМ-22б(0-6)	13,9	14,1	77,5	23,6	8,94	0,83	2,66	0,19	11,7	0,097	2,4	<.002	1,13	0,19	60,7
18-ВСМ-23б(0-2)	14,9	16,8	86,4	25,3	9,3	0,85	2,68	0,22	13	0,1	0,86	<.002	1,21	0,22	55,5
18-ВСМ-23б(2-9)	15,4	16,7	92,5	27,1	9,77	0,92	2,75	0,23	9,95	0,11	0,91	0,0034	3,23	0,23	55,3
18-ВСМ-24к	14,3	14,9	81,7	24,3	8,98	0,87	2,58	0,21	8,5	0,1	1,18	0,003	2,67	0,21	60,1
18-ВСМ-25б	14,1	15,3	80,8	24,2	8,86	0,83	2,56	0,2	10,2	0,11	0,97	0,0065	1,44	0,2	53,5
18-ВСМ-26б(0-6)	15,4	18,8	92,9	27	9,57	0,9	2,67	0,24	10,1	0,11	1,07	0,0085	1,25	0,24	61
18-ВСМ-27б	16,9	19,5	97,5	27,3	10,1	0,86	2,82	0,27	15,5	0,13	1,09	0,0044	0,95	0,27	53
18-ВСМ-28б(0-5)	17,2	17,8	95,6	26,6	9,98	0,93	2,92	0,27	11,5	0,13	1,12	0,0095	2,1	0,27	52,5
18-ВСМ-29б(0-5)	20,4	13,6	75,2	20,2	9,12	0,89	3,12	0,23	16,5	0,11	1,15	0,006	1,03	0,23	41,6
18-ВСМ-30б(0-5)	20,5	14,7	80,8	21,3	9,61	0,87	3,15	0,25	23,2	0,11	0,96	0,0063	0,94	0,25	36,8
18-ВСМ-31б(0-5)	23,6	10,5	65	15,4	8,83	2,37	4,1	0,23	23,7	0,094	1,69	0,0031	0,7	0,23	26,8
18-ВСМ-32к(0-5)	23,7	6,52	44,8	9,78	6,68	0,72	3,95	0,22	17,1	0,08	1,43	0,0022	<0,6	0,22	19,8
18-ВСМ-32к(5-10)	25,2	12,4	58,8	16,2	8,76	0,86	3,6	0,23	13,9	0,1	1,16	<.002	1	0,23	26,5
18-ВСМ-33к(2-10)	24,3	7,73	44,5	10,7	6,5	0,67	3,27	0,18	11,6	0,09	1,09	<.002	0,8	0,18	24,6
18-ВСМ-34к	25,4	6,22	39,9	8,68	6,42	0,64	3,73	0,16	22,4	0,065	2,19	0,0056	0,69	0,16	14,5
18-ВСМ-35к(0-2)	21,4	14,5	76,7	20,8	9,39	0,82	3,43	0,25	16,5	0,13	1,29	0,005	1,04	0,25	41,8
18-ВСМ-35к(5-10)	22,3	16,3	69,4	18,5	8,8	0,74	3,54	0,23	18,1	0,12	1,24	0,0026	0,84	0,23	36,4
18-ВСМ-36к	18,4	12,1	73,2	19,7	8,77	0,74	3,22	0,24	15,4	0,12	1,59	0,0089	<0,6	0,24	43,2
18-ВСМ-37к	21,7	24,5	115	31,6	11	0,9	3,43	0,4	21,3	0,16	1,33	0,0031	1,04	0,4	61
18-ВСМ-38к	16,3	24,3	73,6	20,6	8,43	0,95	3,25	0,23	14,6	0,12	1,76	<.002	0,61	0,23	45,7
18-ВСМ-39к(0-2)	17,9	13	72,9	20,3	8,48	0,82	3,59	0,24	11,6	0,13	1,63	<.002	0,65	0,24	46,1
18-ВСМ-39к(10-15)	22,1	13,2	62,7	16,7	8,76	0,86	3,77	0,23	13,1	0,12	1,56	<.002	0,71	0,23	34,7
18-ВСМ-40к	20,4	14,6	83,3	22,3	10	0,88	3,39	0,28	19,3	0,13	1,58	0,003	1,27	0,28	51
18-ВСМ-41к	18,4	15,8	86,9	23,7	10,1	0,86	3,09	0,26	17	0,12	1,92	<.002	1,45	0,26	49,2
18-ВСМ-42б(90-5)	18,7	16,6	85,5	23,4	10,2	0,84	3,02	0,26	22,3	0,12	1,33	<.002	1,11	0,26	47,1
18-ВСМ-43б(0-5)	19	18,6	97,7	26,6	11,5	0,86	2,96	0,31	21	0,14	1,31	<.002	1,11	0,31	49,6
18-ВСМ-44б(0-2)	20,7	13,8	64,3	17,5	10,4	0,87	3,05	0,21	19,3	0,11	1,39	<.002	1	0,21	35,6
18-ВСМ-44б(2-5)	19,6	13	74,1	20,3	10,5	0,92	3,09	0,23	14,2	0,11	1,17	<.002	1,91	0,23	40,3
18-ВСМ-45б(0-5)	19,8	13,4	74,7	20,6	10,5	0,95	3,07	0,23	18,7	0,11	1,07	0,0067	1,22	0,23	37,2
18-ВСМ-46б(0-6)	19,8	13,7	78,3	21,2	10,3	0,85	3,06	0,24	15	0,12	1,04	<.002	1,3	0,24	44,2
18-ВСМ-47б(0-6)	17,7	14,1	76,2	21	9,72	0,87	2,91	0,22	16	0,12	1,06	<.002	0,83	0,22	48,7
18-ВСМ-48б(0-6)	16,1	13,2	75,6	20,9	9,32	0,78	2,71	0,2	18,4	0,13	1,25	<.002	0,86	0,2	50,5
18-ВСМ-49б(0-6)	16,4	15	78,8	21,9	9,63	0,79	2,6	0,22	15,2	0,12	1,32	<.002	1,26	0,22	55,1
18-ВСМ-50б(0-6)	16,1	16,5	87,2	24,3	9,72	0,87	2,63	0,23	12,7	0,13	1,25	<.002	1,44	0,23	49,7
18-ВСМ-51б 2(0-6)	16,4	16,2	98,2	25,2	9,85	0,87	2,67	0,25	15,6	0,13	1,2	<.002	1,66	0,25	56,3
18-ВСМ-52б(0-5)	13,7	13,8	79	22,5	8,85	0,76	2,41	0,2	11,5	0,11	1,87	<.002	1,22	0,2	58,3
18-ВСМ-53к	17,6	19,5	107	29,6	10,4	0,83	2,66	0,29	17,8	0,15	1,14	<.002	1,32	0,29	63,4
18-ВСМ-54к	25,3	10,6	54,8	15,8	7,23	0,93	2,68	0,18	8,78	0,076	1,15	<.002	<0,6	0,18	39,7
18-ВСМ-55к	25,4	10,9	57,7	16,6	7,77	0,99	2,82	0,22	8,8	0,091	0,82	<.002	1,23	0,22	40,9
18-ВСМ-56к	24,8	6,79	38,8	11,8	5,42	0,99	2,5	0,14	10,4	0,057	1,1	<.002	0,6	0,14	33,1

Приложение №3

Фрагмент таблицы с результатами расчета коэффициентов концентрации Кк для элементов, а также коэффициента суммарного загрязнения Zс.

Источник: Выполнено автором.

Шифр пробы	Pb, ppm	Kk Pb	Cu, ppm	Kk Cu	Zn, ppm	Kk Zn	Ni, ppm	Kk Ni	Cr, ppm	Kk Cr	As, ppm	Kk As	Zc
18-ВСМ-1	29,3	1,47	7,51	0,47	37,8	0,44	6,63	0,28	8,21	0,17	21,4	1,34	1,80
18-ВСМ-2к(0-2)	14,1	0,71	14,6	0,91	66,5	0,78	21,1	0,88	55,8	1,14	10,9	0,68	1,14
18-ВСМ-36(0-5)	17	0,85	13,3	0,83	72,2	0,85	21,7	0,90	46,3	0,94	9,49	0,59	1
18-ВСМ-4к	19,3	0,97	11,2	0,70	57,9	0,68	16,9	0,70	29	0,59	10,1	0,63	1
18-ВСМ-56	25,5	1,28	3,98	0,25	24,2	0,28	4,67	0,19	8,18	0,17	16,3	1,02	1,28
18-ВСМ-6к	29,2	1,46	10,9	0,68	34	0,40	6,69	0,28	8,94	0,18	24,3	1,52	1,98
18-ВСМ-7к(0-10)	26,2	1,31	6,73	0,42	37	0,44	8,74	0,36	17,4	0,35	18,4	1,15	1,46
18-ВСМ-8к	24,6	1,23	13,7	0,86	30,2	0,36	5,78	0,24	12,4	0,25	17,6	1,10	1,33
18-ВСМ-10к	27,1	1,36	5,55	0,35	42,3	0,50	9,25	0,39	15,9	0,32	11,9	0,74	1,36
18-ВСМ-11к(0-2)	19,9	1,00	17	1,06	86,4	1,02	24,6	1,03	47,7	0,97	21	1,31	1,42
18-ВСМ-12к(0-2)	21,8	1,09	16	1,00	83,5	0,98	23	0,96	40,1	0,82	20,1	1,26	1,35
18-ВСМ-13к(0-2)	24,8	1,24	9,8	0,61	53,3	0,63	14	0,58	32,3	0,66	13,2	0,83	1,24
18-ВСМ-14к	27,9	1,40	4,92	0,31	28,8	0,34	7,09	0,30	14,8	0,30	11,9	0,74	1,40
18-ВСМ-15к	25	1,25	8,83	0,55	47,8	0,56	13	0,54	30,3	0,62	13,5	0,84	1,25
18-ВСМ-16к(0-2)	21,7	1,09	16	1,00	84,7	1,00	23	0,96	50	1,02	18,2	1,14	1,24
18-ВСМ-17к	23,4	1,17	11,9	0,74	66,4	0,78	18	0,75	41,5	0,85	11,6	0,73	1,17
18-ВСМ-18к	19,2	0,96	14,9	0,93	82,7	0,97	22,8	0,95	44,4	0,90	13,7	0,86	1
18-ВСМ-19к(0-10)	18,9	0,95	14,4	0,90	79,5	0,94	22,1	0,92	48,3	0,98	12,7	0,79	1
18-ВСМ-206	17,4	0,87	13,8	0,86	77,6	0,91	22	0,92	47,7	0,97	14,1	0,88	1
18-ВСМ-21к(0-10)	15,7	0,79	14,4	0,90	79,2	0,93	22,7	0,95	54,2	1,10	12,9	0,81	1,10
18-ВСМ-226(0-6)	13,9	0,70	14,1	0,88	77,5	0,91	23,6	0,98	60,7	1,24	11,7	0,73	1,24
18-ВСМ-236(0-2)	14,9	0,75	16,8	1,05	86,4	1,02	25,3	1,05	55,5	1,13	13	0,81	1,25
18-ВСМ-24к	14,3	0,72	14,9	0,93	81,7	0,96	24,3	1,01	60,1	1,22	8,5	0,53	1,22
18-ВСМ-256	14,1	0,71	15,3	0,96	80,8	0,95	24,2	1,01	53,5	1,09	10,2	0,64	1,09
18-ВСМ-266(0-6)	15,4	0,77	18,8	1,18	92,9	1,09	27	1,13	61	1,24	10,1	0,63	1,64
18-ВСМ-276	16,9	0,85	19,5	1,22	97,5	1,15	27,3	1,14	53	1,08	15,5	0,97	1,58
18-ВСМ-286(0-5)	17,2	0,86	17,8	1,11	95,6	1,12	26,6	1,11	52,5	1,07	11,5	0,72	1,41
18-ВСМ-296(0-5)	20,4	1,02	13,6	0,85	75,2	0,88	20,2	0,84	41,6	0,85	16,5	1,03	1,02
18-ВСМ-306(0-5)	20,5	1,03	14,7	0,92	80,8	0,95	21,3	0,89	36,8	0,75	23,2	1,45	1,48
18-ВСМ-316(0-5)	23,6	1,18	10,5	0,66	65	0,76	15,4	0,64	26,8	0,55	23,7	1,48	1,66
18-ВСМ-32к(0-5)	23,7	1,19	6,52	0,41	44,8	0,53	9,78	0,41	19,8	0,40	17,1	1,07	1,25
18-ВСМ-33к(2-10)	24,3	1,22	7,73	0,48	44,5	0,52	10,7	0,45	24,6	0,50	11,6	0,73	1,22
18-ВСМ-34к	25,4	1,27	6,22	0,39	39,9	0,47	8,68	0,36	14,5	0,30	22,4	1,40	1,67
18-ВСМ-35к(0-2)	21,4	1,07	14,5	0,91	76,7	0,90	20,8	0,87	41,8	0,85	16,5	1,03	1,07
18-ВСМ-36к	18,4	0,92	12,1	0,76	73,2	0,86	19,7	0,82	43,2	0,88	15,4	0,96	1
18-ВСМ-37к	21,7	1,09	24,5	1,53	115	1,35	31,6	1,32	61	1,24	21,3	1,33	2,86
18-ВСМ-38к	16,3	0,82	24,3	1,52	73,6	0,87	20,6	0,86	45,7	0,93	14,6	0,91	1,52
18-ВСМ-39к(0-2)	17,9	0,90	13	0,81	72,9	0,86	20,3	0,85	46,1	0,94	11,6	0,73	1
18-ВСМ-40к	20,4	1,02	14,6	0,91	83,3	0,98	22,3	0,93	51	1,04	19,3	1,21	1,26
18-ВСМ-41к	18,4	0,92	15,8	0,99	86,9	1,02	23,7	0,99	49,2	1,00	17	1,06	1,06
18-ВСМ-426(90-5)	18,7	0,94	16,6	1,04	85,5	1,01	23,4	0,98	47,1	0,96	22,3	1,39	1,44
18-ВСМ-436(0-5)	19	0,95	18,6	1,16	97,7	1,15	26,6	1,11	49,6	1,01	21	1,31	1,74
18-ВСМ-446(0-2)	20,7	1,04	13,8	0,86	64,3	0,76	17,5	0,73	35,6	0,73	19,3	1,21	1,24
18-ВСМ-456(0-5)	19,8	0,99	13,4	0,84	74,7	0,88	20,6	0,86	37,2	0,76	18,7	1,17	1,17
18-ВСМ-466(0-6)	19,8	0,99	13,7	0,86	78,3	0,92	21,2	0,88	44,2	0,90	15	0,94	1
18-ВСМ-476(0-6)	17,7	0,89	14,1	0,88	76,2	0,90	21	0,88	48,7	0,99	16	1,00	1
18-ВСМ-486(0-6)	16,1	0,81	13,2	0,83	75,6	0,89	20,9	0,87	50,5	1,03	18,4	1,15	1,18
18-ВСМ-496(0-6)	16,4	0,82	15	0,94	78,8	0,93	21,9	0,91	55,1	1,12	15,2	0,95	1,12
18-ВСМ-506(0-6)	16,1	0,81	16,5	1,03	87,2	1,03	24,3	1,01	49,7	1,01	12,7	0,79	1,07
18-ВСМ-516 2(0-6)	16,4	0,82	16,2	1,01	98,2	1,16	25,2	1,05	56,3	1,15	15,6	0,98	1,36
18-ВСМ-526(0-5)	13,7	0,69	13,8	0,86	79	0,93	22,5	0,94	58,3	1,19	11,5	0,72	1,19
18-ВСМ-53к	17,6	0,88	19,5	1,22	107	1,26	29,6	1,23	63,4	1,29	17,8	1,11	2,11
18-ВСМ-54к	25,3	1,27	10,6	0,66	54,8	0,64	15,8	0,66	39,7	0,81	8,78	0,55	1,27
18-ВСМ-55к	25,4	1,27	10,9	0,68	57,7	0,68	16,6	0,69	40,9	0,83	8,8	0,55	1,27
18-ВСМ-56к	24,8	1,24	6,79	0,42	38,8	0,46	11,8	0,49	33,1	0,67	10,4	0,65	1,24
18-ВСМ-57к	23,5	1,18	19,3	1,21	91	1,07	26,5	1,10	47,5	0,97	17,9	1,12	1,67
18-ВСМ-58к	20,3	1,02	21,2	1,33	105	1,24	30,2	1,26	54,7	1,11	21,3	1,33	2,28
18-ВСМ-59к	21,3	1,07	17,9	1,12	90,4	1,06	26	1,08	53	1,08	19,1	1,19	1,60
18-ВСМ-60к	21,1	1,06	22,9	1,43	138	1,62	32,6	1,36	54,4	1,11	14,5	0,91	2,58
18-ВСМ-61к	15,1	0,76	15,6	0,98	77,7	0,91	24,1	1,00	41,2	0,84	17,7	1,11	1,11
18-ВСМ-62к	21,2	1,06	23,6	1,48	115	1,35	33,1	1,38	53,4	1,09	16,5	1,03	2,35
18-ВСМ-63к	19,9	1,00	21,4	1,34	105	1,24	31,1	1,30	53,4	1,09	22,9	1,43	2,39
18-ВСМ-64к	20,5	1,03	21,8	1,36	109	1,28	31,7	1,32	51,6	1,05	23,7	1,48	2,52
18-ВСМ-656(0-5)	19,1	0,96	20,4	1,28	96,5	1,14	28,1	1,17	48,5	0,99	16,1	1,01	1,58
18-ВСМ-66к(2-10)	18	0,90	24,2	1,51	93,5	1,10	27,2	1,13	48,5	0,99	11,2	0,70	1,75
18-ВСМ-676(0-5)	16,2	0,81	13,3	0,83	86,5	1,02	23,2	0,97	39,8	0,81	18,6	1,16	1,18
18-ВСМ-686(0-10)	20	1,00	23,6	1,48	109	1,28	31,1	1,30	53,3	1,09	19,9	1,24	2,38
18-ВСМ-696(0-5)	19,6	0,98	21,5	1,34	107	1,26	30,9	1,29	55,9	1,14	15,4	0,96	2,03
18-ВСМ-70к	20,2	1,01	23,2	1,45	110	1,29	31,6	1,32	57,1	1,16	23,4	1,46	2,70
18-ВСМ-71к	16,1	0,81	15,9	0,99	81,3	0,96	24,6	1,03	41,6	0,85	18,1	1,13	1,16
18-ВСМ-72к	17,1	0,86	16,4	1,03	86,7	1,02	25,5	1,06	60,3	1,23	16,5	1,03	1,34
18-ВСМ-73к	17,3	0,87	17,8	1,11	89,6	1,05	26,3	1,10	55,5	1,13	15,3	0,96	1,39
18-ВСМ-74к	17,8	0,89	17,4	1,09	89,8	1,06	27,2	1,13	51,1	1,04	14,3	0,89	1,32
18-ВСМ-75к	18,7	0,94	22	1,38	100	1,18	29,5	1,23	53,5	1,09	20	1,25	2,12
18-ВСМ-76к	20,8	1,04	22,3	1,39	110	1,29	31,5	1,31	55,2	1,12	22	1,38	2,54
18-ВСМ-77к	20,7	1,04	21,6	1,35	109	1,28	31,4	1,31	54,3	1,11	23,4	1,46	2,54

Список литературы

1. Г.И. Акименко, А.В. Акименко. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Ашойско-Чаунская. Лист R-58-XXXV, XXXVI. Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
2. Алексеев М.Н. Проблемы четвертичной стратиграфии и палеогеографии шельфовых зон. Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. – М.: Наука, 1984. 215 с.
3. Анисимов М.А., Гумской В.Е., Саватюгин Л.М. К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Известия Русского Географического общества, 2002, т. 134, вып. 5, с. 32–37.
4. Архипов С.А. Корреляция плейстоценовых событий на Северо-Азиатском континенте // Стратиграфия и корреляция четвертичных отложений Азии и Тихоокеанского региона. М., Наука, 1991, с. 4-14.
5. Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние 1985, 176 с.
6. Безродных Ю.П., Векслер В.С., Савваитов А.С., Стелле В.Я. Корреляция по 14С палеогеографических событий позднего плейстоцена и голоцена отдельных районов Арктики // Изотопно-геохимические исследования в Прибалтике и Белоруссии. Таллин, Ин-т геологии, 1986, с. 5–12.
7. Белов Н.А., Лапина Н.Н. Донные отложения Арктического бассейна. Л., Морской транспорт. 1961. 150 с.
8. Введенский Б. А. (гл.ред) Большая Советская Энциклопедия. 1952. Т. 15.
9. Бондаренко С. А., Виноградов В. А., Горячев Ю. В., Гусев Е. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Чукотская. Лист R-1, 2 – остров Врангеля. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014, 144 с. + 12 вкл.
10. Буренков В.И., Шевченко В.П. Пространственное распределение взвешенного вещества в арктических морях по оптическим данным (тез.) // Геология морей и океанов. XIII Межд. Школа морской геологии. М. 1999. Т. 1. С 122.
11. Вейнбергс И.Г. Древние морские берега СССР (особенности распространения, генезиса и степень изменения). Дисс. на соискание степени доктора геогр. наук, 1990, 428 с.
12. Данилов И.Д. Кайнозой Арктического побережья Чукотки // Изв. АН СССР Сер. геол. 1980. № 6. С. 53-62.
13. А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. Моря СССР. Изд-во Моск. ун-та, 1982.
14. Зелинская Е. В. Воздействие разработки россыпей на окружающую среду /Е. В. Зелинская, О. И Горбунова., Л. М. Щербакова. // Горный журнал. 1998. № 5. С. 27–28.
15. Кошелева В.А. и Яшин Д.С. «Донные осадки Арктических морей России» (1999)
16. Кудряшова Л. К, Гранулометрический анализ как основной метод обоснования условий формирования пластов коллекторов юк₂₋₅ ем-еговской площади, Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. №10.
17. Рекант П.В. Эволюция природных обстановок Лаптевоморской континентальной окраины в позднем плейстоцене на основании анализа сейсмоакустических материалов // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. - Апатиты, 2001. - Кн.2-С.91-99.
18. Шведов Д. С. Эволюция геосистем речных долин, нарушенных в результате разработки россыпных месторождений // Материалы XIV совещания Сибири и Дальнего Востока. Владивосток, 2011. С. 440–443
19. П.Д.Яковлев «Промышленные типы рудных месторождений. Учебное пособие для вузов» Недра, Москва, 1986 г., 358 стр., УДК: 553.3
20. Яшин Д.С. Донные осадки арктических морей России. СПб., ВНИИ Океангеология, 1999. 286 с.
21. Мазарович А.О. Строение дна Мирового океана и окраинных морей России (учебное пособие), ГЕОС, Москва, 2005 г., 192 стр., УДК: 551.242, ISBN: 5-89118-157-6

22. Сает, Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др.— М. : Недра, 1990 .— 333,[2] с. : ил. — Авт. указаны на обороте тит. л. — ISBN 5-247-01127-9.
23. Ильин А.Г. Загрязнение окраинных областей российской Арктики. Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, г. Мурманск, 2009
24. В. В. Авдонин, В. Е. Бойцов, В. М. Григорьев, Ж. В. Семинский, Н. А. Солодов, В. И. Старостин. Месторождения металлических полезных ископаемых. — Академический Проект, 2005. Трикста, Москва, 2005 г., 720 стр., УДК: 553.3/.4-553.5/.9, ISBN: 5-8291-0509-8
25. Лаломов А.В., Таболич С.Э. Определение времени образования Валькумейской прибрежно-морской россыпи (Восточно-Сибирское море). Литология и полезные ископаемые, 2004, №4, с. 369-374
26. Иванова А.М., Смирнов А.Н., Ушаков В.И., Черкашев Г.А. Кайнозойские россыпи Арктической континентальной окраины России // Разведка и охрана недр. 2000. № 12. С. 35-40.
27. Valsangkar, A. J. Principles, methods and applications of particle size analysis. Can. Geotech. J. 29, 1006 (1992).
28. Andre Guinier (1952). X-ray Crystallographic Technology. London: Hilger and Watts LTD. p. 271
29. Prothero, Donald R.; Schwab, Fred (1996), Sedimentary Geology: An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy, W. H. Freeman, ISBN 978-0-7167-2726-2
30. Serreze, Mark C; Barry, Roger G (2014). The Arctic Climate System (2nd ed.). New York: Cambridge University Press. pp. 56–59. ISBN 978-1-107-03717-5
31. Neatby, Leslie H., Discovery in Russian and Siberian Waters 1973 ISBN 0-8214-0124-6
32. Ray, L., and Bacon, B., eds., The Arctic Ocean 1982 ISBN 0-333-31017-9
33. WGMS 2003. Report of the Working Group on Marine Sediments in Relation to Pollution. ICES CM 2003/ E:04
34. 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.
35. 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 с.
36. Sarala, Pertti & Koskinen, Hanna. 2018. Application of the portable X-Ray Diffraction (pXRD) analyser in surficial geological exploration. 70.